

НТЦ-22.05.24
**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОТЫ
ПАРООБРАЗОВАНИЯ**

Методические рекомендации
по выполнению
лабораторных работ

улица Гришина, 94В,
212000, г. Могилев,
Республика Беларусь
тел/факс (+375 -222) 78-14-14,
78-37-37

E-mail: ntp@ntpcentr.com
www.ntpcentr.com

ОПИСАНИЕ УЧЕБНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Учебный лабораторный стенд предназначен для проведения серии экспериментов по определению величины теплоты парообразования.

Конструктивно стенд состоит из рамы с вертикальной панелью, термостата с защитным прозрачным кожухом и контрольно-измерительного устройства.

Рама представляет собой металлическую сборно-сварную конструкцию, на которой установлены основание корпуса нагревателя, панель для крепления измерителя абсолютного давления и крепежная пластина контрольно-измерительного устройства.

Термостат представляет собой сборную конструкцию совместно с нагревателем и фиксатором колбы Бузена. Нагреватель расположен в нижней части термостата. Фиксатор колбы Бузена размещен внутри стеклянного стакана термостата и фиксирует центральное положение колбы Бузена в нем.

Контрольно-измерительное устройство предназначено для измерения температуры ампулы с водой и давления водяного пара. Для включения изделия служит клавиша включения питания с подсветкой справа на лицевой панели.

Информационное табло служит для вывода на лицевую панель текущей температуры ($^{\circ}\text{C}$) воды в колбе Бузена с дискретностью $0,1^{\circ}\text{C}$.

Измерение величины разрежения осуществляется вакуумметром, закрепленным на вертикальной панели.

Включение нагревателя осуществляется одноименным тумблером (вначале эксплуатации возможно при разогреве нагревателя выделение постороннего запаха от теплоизолятора, которое затем прекратится). Для регулирования интенсивности нагрева колбы Бузена, необходимо повернуть ручку «Нагрев» по часовой стрелке до появления свечения на индикаторе «Нагрев» и затем установить в позицию не далее, чем на 7-е деление (соседнее справа от вертикального положения регулятора, чтобы шел равномерный прогрев колбы Бузена и не перегревался нагреватель что может вызвать появление постороннего запаха). Крайнее правое положение ручки нагревателя соответствует мощности около 350-400 Вт. Оно не используется в экспериментах (работа в этом положении возможна не более 3 мин). Рабочий диапазон регулятора в длительных режимах: от 1/2 от начала шкалы и 1-2 деления вправо по часовой стрелке.

На задней панели изделия расположены:

- кабельные вводы для подключения нагревателя, датчика температуры, измерителя абсолютного давления;
- предохранитель (2А) цепи питания установки;
- сетевой шнур питания.



ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ СО СТЕНДОМ

При отсутствии воды в колбе Бузена или её недостаточном уровне (металлическая гильза термодатчика погружена в воду менее чем на 1см, но она не должна быть выше нижней кромки изоляции шнура термодатчика) необходимо пополнить ее количество. Для этого при отсутствии разреза в колбе Бузена необходимо разъединить быстроразъемную муфту над верхней металлической крышкой стенда с лицевой стороны. Для этого отсоединяемый участок трубки с усилием надавить в сторону муфты, чтобы уплотнительное кольцо с этой же стороны слегка подалось к муфте и зафиксировав кольцо пальцами потянуть наружу от муфты трубку. Далее необходимо набрать 20-25 мл воды (половину или чуть менее) шприца объемом 50мл и подсоединить его штуцер к трубке, идущей в колбу Бузена. Затем потянуть на себя поршень шприца до максимального положения, создавая разрежение в колбе Бузена и далее плавно вернуть в исходное свободное состояние – при этом вода будет всасываться в колбу Бузена. При необходимости повторить процедуру до достижения нужного уровня воды в колбе Бузена. Затем отсоединить шприц от трубки. Трубку коротким энергичным движением утопить до упора в быстроразъемную муфту.

Наполнение стакана термостата производится непосредственно перед опытом слегка подогретой водой до 45°C - 55°C в электрочайнике из комплекта поставки. Для этого установить воронку из комплекта поставки в отверстие в верхней металлической крышке. Медленно подливать воду до достижения уровня по шкале стакана около 1000мл.

При длительных перерывах между использованием стенда рекомендуется откачать воду из стакана термостата с помощью шприца объемом 100мл с составной трубкой.

В колбе Бузена вода только пополняется при необходимости.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ НА СТЕНДЕ

Лабораторная работа №1	5
▶ Измерение теплоты парообразования	5



Лабораторная работа №1

Измерение теплоты парообразования



Цель работы

- ✓ Получение практических навыков по измерению теплоты парообразования.



Теоретическая справка

Парообразованием называется переход вещества из жидкого состояния в пар. Парообразование, происходящее при любых температурах с открытой поверхности жидкости, называется **испарением**.

Явление испарения объясняется тем, что молекулы жидкости, обладающие достаточно большой кинетической энергией, преодолевают притяжение соседних молекул и вылетают с её поверхности, что ведёт к уменьшению внутренней энергии жидкости, т. е. её охлаждению. Обратный процесс перехода пара в жидкость называется **конденсацией**.

Процессы испарения и конденсации идут одновременно. А пар, находящийся в динамическом равновесии с жидкостью, называется **насыщенным**.

Давление (упругость) насыщенного пара возрастает с повышением температуры. При нагревании жидкости до температуры, при которой давление её насыщенных паров станет равным внешнему (атмосферному) давлению, испарение жидкости будет происходить не только с поверхности, но и во всем её объёме, где начинают возникать пузырьки пара, всплывающие на поверхность и разрывающиеся над ней. Бурное выделение паров изнутри жидкости называется **кипением**. В течение всего процесса кипения температура остаётся постоянной, если кипение жидкости происходит при постоянном давлении. Чтобы жидкость кипела, необходимо нагреть её до температуры кипения, а затем сообщить добавочное количество тепловой энергии.

Количество теплоты, необходимое для превращения в пар единицы массы жидкости, нагретой до температуры кипения, называется **удельной теплотой парообразования** – r . При конденсации не происходит понижения температуры пара. При этом выделяется теплота за счёт уменьшения потенциальной энергии молекул вещества при переходе его из одного агрегатного состояния в другое. Количество теплоты, выделяемое в окружающую среду при переходе единицы массы пара в жидкое состояние, называется **удельной теплотой конденсации**. (Удельная теплота конденсации равна удельной теплоте парообразования).

Удельная теплота парообразования r идёт на работу A , совершаемую молекулами при прохождении сквозь поверхностный слой жидкости, и на работу A' связанную с увеличением удельного объема V_0 вещества при его переходе из жидкого состояния в газообразное: $r = A + A'$. Толщина поверхностного слоя, в пределах которого на молекулу действуют силы притяжения, равна радиусу молекулярного действия R . Обозначив среднюю силу, действующую на длине этого радиуса молекулярного действия через F , получим выражение для работы вырывания одной молекулой: $A = F \cdot R$.

Работа A , совершаемая всеми молекулами, находящимися в единице массы жидкости равна:

$$A = n \cdot \Delta A = n \cdot F \cdot R \quad (1.1)$$

где n – число молекул в единице массы.

Работа расширения вычисляется по формуле:

$$A' = p \cdot (V'_0 - V_0) \quad (1.2)$$

где V_0 – удельный объем пара, т.е. объём занимаемый единицей массы пара;
 V'_0 – удельный объём жидкости;
 p – давление, при котором происходит кипение.

Тогда

$$r = n \cdot F \cdot R + p \cdot (V'_0 + V_0) \quad (1.3)$$

Это соотношение не позволяет непосредственно вычислить значение r так как остаются неизвестными F и R , но оно показывает, что r зависит от той же силы молекулярного взаимодействия F , которая обуславливает и наличие поверхностного натяжения. Для определения удельной теплоты парообразования пользуются калориметрическим методом, для чего составляют на основании опыта уравнение теплового баланса.

Предполагая, что тепловой обмен происходит без потери тепла в окружающую среду, можно составить уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (1.4)$$

где $Q_1 = r \cdot m_0$ – количество теплоты, отданное паром при конденсации его в жидкость;

m_0 – масса сконденсированного пара;

$Q_2 = c \cdot m_0 (t_1 - t)$ – количество теплоты, выделенное при охлаждении образовавшейся из пара воды от температуры конденсации t_1 до температуры смеси t ;

$Q_3 = c \cdot m (t - t_0)$ – количество теплоты, полученное водой в калориметре при прохождении пара;

$Q_4 = c_1 \cdot m_1 (t - t_0)$ – количество теплоты, полученное калориметром, где c и c_1 – удельные теплоемкости воды и калориметра,

m_1 и m_2 – масса воды в калориметре и внутреннего сосуда калориметра;

t_0 – начальная температура воды и калориметра;

t – температура смеси.

Подставив значения Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 в (1.4), получим

$$r \cdot m_0 + c \cdot m_0 (t_1 - t) = (c \cdot m + c_1 \cdot m_1) (t - t_0) \quad (1.5)$$

откуда

$$r = \frac{(c \cdot m + c_1 \cdot m_1)(t - t_0) - c \cdot m_0 (t_1 - t)}{m_0} \quad (1.6)$$



Равновесия в гетерогенных системах, в которых не происходит химического взаимодействия между компонентами, а протекают лишь процессы перехода компонентов из одной фазы в другую (или другие), называются **фазовыми равновесиями**.

В однокомпонентных системах различают следующие фазовые переходы:

- жидкость \leftrightarrow пар (испарение и конденсация);
- тв. вещество \leftrightarrow пар (возгонка и сублимация);
- тв. вещество \leftrightarrow жидкость (плавление и кристаллизация);
- тв. вещество \leftrightarrow тв. вещество (полиморфные превращения).

В настоящей лабораторной работе рассматривается процесс испарения жидкостей.

Давление насыщенного пара индивидуальных жидкостей

Переход жидкости в пар возможен, если кинетическая энергия молекул больше энергии межмолекулярного притяжения в жидкости. Жидкости, в которых межмолекулярное взаимодействие невелико, обладают большой способностью к испарению. Жидкости, в которых проявляются сильные межмолекулярные взаимодействия (полярные) обладают пониженной способностью к испарению. Наряду с процессом испарения происходит и обратный процесс – конденсация. При равенстве скоростей этих процессов в системе возникает динамическое равновесие между жидкостью и паром.

Насыщенным паром называется пар, находящийся в динамическом равновесии с жидкостью.

Давлением насыщенного пара (P) называется давление, которое оказывает пар, находящийся в равновесии с жидкостью, на поверхность жидкости и стенки сосуда.

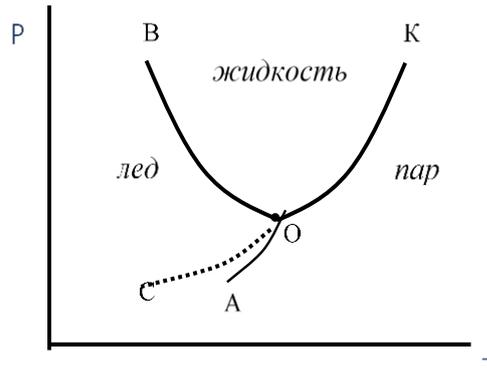
Давление насыщенного пара характеризует способность жидкости к испарению и является одним из важнейших свойств жидкости. Оно зависит от природы жидкости и температуры и не зависит от объема пара и количества жидкости. На давление пара помимо перечисленных факторов оказывает влияние также форма (кривизна) поверхности жидкости и наличие на ней электрического заряда. Давление насыщенного пара для каждого вещества является величиной постоянной при данной температуре. При повышении температуры давление насыщенного пара жидкостей возрастает вследствие увеличения кинетической энергии молекул. Температура, при которой давление насыщенного пара жидкостей сравнивается с внешним давлением, а переход молекул из жидкости в пар осуществляется не только с поверхности жидкости, но и по всему объему, называется **температурой кипения**.

Таким образом, над кипящей жидкостью присутствует насыщенный пар, давление которого равно внешнему давлению, а температура кипения жидкостей будет определяться природой жидкости и внешним давлением.

Двухфазное равновесие ($f = 2$) в однокомпонентной системе ($K = 1$) характеризуется одной термодинамической степенью свободы ($S = 1$). Такой вывод следует из правила фаз Гиббса:

$$S = K - f + 2 = 1 - 2 + 2 = 1 \quad (1.7)$$

Это означает, что из двух термодинамических параметров (температуры T и давления P), определяющих состояние равновесия между двумя сосуществующими фазами, произвольно изменять можно лишь один (либо T , либо P). При этом второй параметр будет закономерно изменяться, подчиняясь некоторой математической зависимости. Таким образом, переменные P и T выступают в данном случае как функция и аргумент. Взаимосвязь этих переменных может быть представлена графически – в виде кривой в координатах $P - T$, называемой фазовой диаграммой, или аналитически – в виде соответствующего уравнения. На рисунке 1.1 в качестве примера приведена диаграмма состояния воды.



кривые АО – возгонки–сублимации; ОК – испарения–конденсации; ОВ – плавления–кристаллизации; О – тройная точка, отвечающая равновесию трех фаз

Рисунок 1.1 - Диаграмма состояния воды при невысоких давлениях

Наиболее общим уравнением, связывающим P и T при равновесии между двумя фазами, является вытекающее из второго закона термодинамики уравнение Клапейрона – Клаузиуса.

Уравнение Клапейрона – Клаузиуса. Расчет теплоты испарения

Для равновесного состояния между жидкостью и паром уравнение Клапейрона – Клаузиуса может быть получено следующим образом.

Согласно второму закону термодинамики, если система находится в равновесии, то при данных условиях (P, T) работа не совершается:

$$A_p = 0; G_{ж} - G_n = 0; G_{ж} = G_n \tag{1.8}$$

то есть свободные энергии Гиббса индивидуального вещества в жидком и парообразном состоянии равны (условие равновесия).

Если изменение внешнего параметра произойдет на бесконечно малую величину – dT , то и изобарно-изотермические потенциалы изменятся на бесконечно малую величину:

$$dG_{ж} = dG_n \tag{1.9}$$

Изобарно-изотермический потенциал представляет собой свободную энергию системы и является функцией давления и температуры:

$$dG = VdP - SdT \tag{1.10}$$



поэтому с его помощью можно установить количественную зависимость между давлением насыщенного пара и температурой.

После подстановки соответствующих значений dG в уравнение (1.9) имеем в состоянии равновесия:

$$V_{\text{ж}} dP - S_{\text{ж}} dT = V_{\text{п}} dP - S_{\text{п}} dT \quad (1.11)$$

откуда

$$\frac{dp}{dT} = \frac{S_{\text{п}} - S_{\text{ж}}}{V_{\text{п}} - V_{\text{ж}}} \quad (1.12)$$

где $(S_{\text{п}} - S_{\text{ж}})$ и $(V_{\text{п}} - V_{\text{ж}})$ – изменение соответственно энтропии и объема системы при переходе вещества из жидкого в парообразное состояние.

Фазовое превращение в данном случае рассматривается как изотермический процесс, поэтому изменение энтропии в соответствии со вторым законом термодинамики определяется для процесса испарения следующим соотношением:

$$\Delta S = S_{\text{п}} - S_{\text{ж}} = \frac{\Delta H_{\text{исп}}}{T} \quad (1.13)$$

где $\Delta H_{\text{исп}}$ – теплота испарения (изменение энтальпии при испарении) – количество теплоты, необходимое для перевода жидкости в пар,
 T – температура кипения.

Подставив выражение (1.13) в уравнение (1.12) получим:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{исп}}}{T \cdot \Delta V_{\text{исп}}} \quad (1.14)$$

где $\Delta V_{\text{исп.}} = V_{\text{п}} - V_{\text{ж}}$ – изменение объема вещества при испарении.

Величины $\Delta V_{\text{исп}}$ и $\Delta H_{\text{исп}}$ должны характеризовать одно и тоже количество вещества, и, чаще всего, их относят к 1 молю индивидуального вещества.

Уравнение (1.14) называется уравнением **Клапейрона – Клаузиуса** для процесса испарения. Оно описывает взаимосвязь давления насыщенного пара и температуры при любом фазовом переходе, а для процесса кипения – взаимосвязь внешнего давления и температуры кипения жидкостей. Так как $\Delta H_{\text{исп}} > 0$, а объем при испарении возрастает ($\Delta V_{\text{исп}} = V_{\text{п}} - V_{\text{ж}} > 0$), то производная $\frac{dP}{dT} > 0$ и, следовательно, с увеличением температуры давление насыщенного пара возрастает (кривая ОК на рисунке 1.1).

Уравнение (1.14) выведено для процесса испарения, однако оно является общим для всех фазовых переходов. В этом случае оно имеет вид:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{фаз.п}}}{T \cdot \Delta V_{\text{фаз.п}}} \quad (1.15)$$

где $\Delta H_{\text{фаз.п.}}$ и $\Delta V_{\text{фаз.п.}}$ – изменения энтальпии и объема при соответствующих фазовых переходах.

Для процесса испарения уравнение Клапейрона – Клаузиуса можно преобразовать, приняв следующие приближения:

1. Поскольку объем пара V_n намного больше объема такого же количества жидкости $V_{\text{ж}}$, (например, для воды мольный объем в парообразном состоянии при нормальных условиях $V_n = 22400 \text{ см}^3$, а мольный объем в жидком состоянии $V_{\text{ж}} = 18 \text{ см}^3$), то без большой погрешности можно пренебречь величиной $V_{\text{ж}}$, и принять, что $\Delta V_{\text{исп}} = V_n$.

2. При не слишком высоких давлениях и температурах (вдали от критических) можно применить уравнение состояния для идеальных газов и к реальным системам. Тогда для 1 моля газа:

$$\Delta V_{\text{исп}} = V_n = \frac{RT}{P} \quad (1.16)$$

где $R=8,314 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$ – универсальная газовая постоянная.

Подставив (1.16) в (1.4) получим:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{исп}} \cdot P}{RT^2} \quad (1.17)$$

которое после преобразования:

$$\frac{dP}{P \cdot dT} = \frac{\Delta H_{\text{исп}}}{RT^2} \quad (1.18)$$

принимает вид:

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{исп}}}{RT^2} \quad (1.19)$$

где $\Delta H_{\text{исп}}$ – теплота испарения 1 моля вещества, Дж/моль.

Аналогичное уравнение может быть получено и для процесса возгонки.

Для расчетов применяется интегральная форма уравнения Клапейрона – Клаузиуса. В точных расчетах учитывается, что теплота испарения зависит от температуры: с повышением температуры теплота испарения понижается. При критической температуре теплота испарения равна нулю. Однако при температурах, далеких от критической, изменения $\Delta H_{\text{исп}}$ с температурой не очень велики. В небольшом интервале температур $\Delta H_{\text{исп}}$ можно считать постоянной.

Интегрирование уравнения Клапейрона – Клаузиуса (1.19) в пределах от T_1 до T_2 , которым соответствуют давления P_1 и P_2 , при постоянном значении $\Delta H_{\text{исп}}$ позволяет получить уравнение (1.21):

$$\int_{P_1}^{P_2} d \ln P = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\Delta H_{\text{исп}}}{RT^2} \quad (1.20)$$



$$\ln \frac{P_2}{P_1} = -\frac{\Delta H_{\text{исп}}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (1.21)$$

Уравнение (1.21) может быть использовано для расчета $\Delta H_{\text{исп}}$, если известны давления насыщенного пара при двух температурах:

$$\Delta H_{\text{исп}} = -\frac{R \ln \frac{p_2}{p_1}}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (1.22)$$

или

$$\Delta H_{\text{исп}} = -\frac{RT_1 T_2 \ln \frac{p_2}{p_1}}{(T_2 - T_1)} \quad (1.23)$$

Из уравнения (1.21) можно по известной теплоте испарения и данных о давлении насыщенного пара при одной температуре рассчитывать давление насыщенного пара при другой температуре или температуру кипения при заданном внешнем давлении.

При неопределенном интегрировании уравнения Клапейрона – Клаузиуса получим:

$$\ln P = -\frac{\Delta H_{\text{исп}}}{R} \cdot \frac{1}{T} + \text{const} \quad (1.24)$$

Обозначим величину $\frac{\Delta H_{\text{исп}}}{R} = A$, а константу интегрирования B . Тогда

$$\ln P = -A \cdot \frac{1}{T} + B \quad (1.25)$$

Уравнение (1.25) позволяет вычислить давление насыщенного пара над жидкостью при любой температуре, если известны константы A и B . Константы A и B определяют на основе экспериментальных данных аналитическим или графическим методом.

Аналитический метод заключается в подстановке соответствующих пар значений P и T в уравнение (1.25). Получаем систему уравнений:

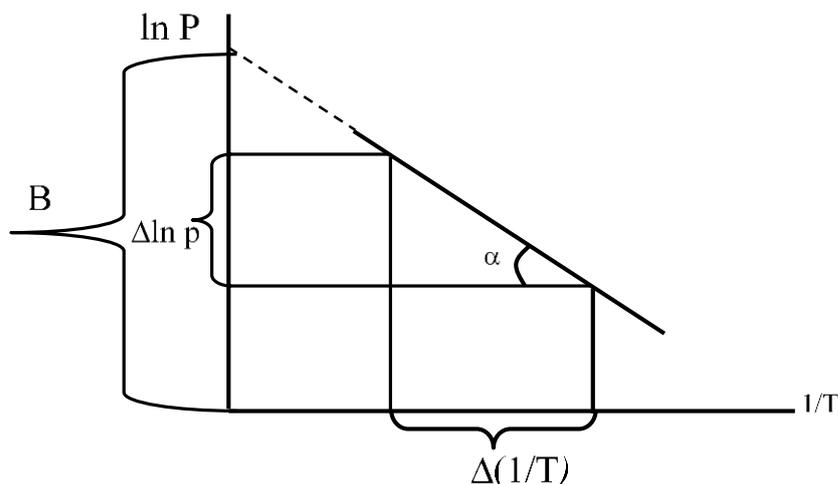
$$\lg p_1 = -A \cdot \frac{1}{T_1} + B, \quad \lg p_2 = -A \cdot \frac{1}{T_2} + B \quad (1.26)$$

совместное решение которых позволяет найти A и B .

Уравнение (1.25) отвечает линейной зависимости (рисунок 1.2):

$$\ln p = f \left(\frac{1}{T} \right) \quad (1.27)$$

Поэтому константы A и B линейного уравнения могут быть определены графически на основе построения данной зависимости.


 Рисунок 1.2 - Зависимость $\ln P$ от $1/T$ при испарении

Тангенс угла наклона прямой равен константе A :

$$A = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta(\ln p)}{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)} \quad (1.28)$$

а отрезок, отсекаемый на оси ординат, равен постоянной интегрирования B (рисунок 1.2). Графический метод позволяет усреднить полученные экспериментальные данные.

Найденное значение константы A может быть использовано для расчета теплоты испарения:

$$\Delta H_{\text{исп}} = R \cdot A = R \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (1.29)$$

Оценка полярности исследуемой жидкости

В соответствии с правилом, установленным Трутоном, мольная теплота испарения неполярных жидкостей (Дж/моль) связана с их температурой кипения при атмосферном давлении $T_{\text{кип}}^0$ (К) соотношением:

$$\frac{\Delta H_{\text{исп}}}{T_{\text{кип}}^0} = \Delta S_{\text{исп}} = 89,12 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \quad (1.30)$$

то есть мольные энтропии испарения неполярных жидкостей при атмосферном давлении в точках кипения постоянны. Это правило не выполняется в случае полярных (ассоциированных) жидкостей (вода, аммиак, спирты), для них величина $\Delta S_{\text{исп}}$ всегда имеет более высокое значение. Поэтому теплота испарения полярной жидкости всегда выше теплоты испарения, вычисленной по правилу Трутона, в связи с тем, что на разрушение ассоциатов затрачивается дополнительное количество энергии.

Оценку полярности жидкости (полярная или неполярная) можно получить, если сравнить теплоту испарения, вычисленную по правилу Трутона:

$$\Delta H_{\text{исп}} = 89,12 T_{\text{кип}}^0 \quad (1.31)$$

с экспериментально найденной величиной по уравнению Клапейрона – Клаузиуса.



Практическая часть

Порядок подготовки к работе:

- Подогрейте воду в электрочайнике до температуры 45°C - 55°C и залейте в стакан термостата до уровня около 1000 мл (см. п. «Подготовка стенда к работе»).
- Состыкуйте пневмотрубку от стенда с вакуумнасосом. Убедитесь, что вакуумнасос отключен, а поворотный пневмокран в трассе, идущей от вакуумнасоса к пневмокрану на задней стенке стенда, открыт. Вакуумнасос подключите к сети 220В, 50Гц.
- Убедитесь, что тумблер «Нагрев» отключен и регулятор нагрева находится в крайней левой против хода часовой стрелки позиции. Включите стенд клавишным выключателем «Сеть».
- На индикаторе «Температура» через небольшую паузу после запуска отобразится текущая температура воды в колбе.
- Включите вакуумнасос и по достижении максимального разрежения по вакуумметру (более - 90кПа) – перекройте пневмокран в трассе, идущей от вакуумнасоса. Затем отключите вакуумнасос.
- Включите тумблер «Нагрев» и поверните регулятор вправо до появления свечения индикатора «Нагрев». Затем установите его в первое положение справа от вертикального (7-я позиция). Следите за показаниями индикатора «Температура» и вакуумметра. Контролируйте состояние воды в колбе. При температуре более 40°C и разрежении более -90кПа в воде начнут образовываться и бурлить пузырьки – начнется процесс кипения.
- Зафиксируйте показания приборов и занесите их в таблицу 1.1.
- Далее аккуратно начните приоткрывать пневмокран в трассе идущей от вакуумнасоса и понизьте разрежение на 1деление по шкале – кипение прекратится. Следите за ростом температуры и зафиксируйте показания приборов при повторном возникновении кипения. Данные занесите в таблицу 1.1.
- Повторите несколько раз процедуру с понижением разрежения, каждый раз занося данные при возникновении кипения воды.



Не рекомендуется превышать температуру воды в колбе более 65°C-70°C.

⚙ Измерение теплоты парообразования

Кипение происходит при той температуре, при которой давление насыщенного пара равняется внешнему давлению. Измерение температур кипения при разных давлениях дает зависимость давления насыщенного пара от температуры.

Понижение давления в системе измеряют по вакуумметру.

Вакуумметр показывает насколько ниже давление в системе по сравнению с атмосферным. Следовательно, давление, при котором жидкость закипает – P равно разности

между барометрическим (атмосферным) давлением $P_{бар}$ и разрежением в системе ΔP , определяемое с помощью вакуумметра:

$$P = P_{бар} - \Delta P \quad (1.33)$$

Это внешнее давление в системе и будет давлением насыщенного пара жидкости при температуре кипения.

Отсчеты по термометру следует делать с точностью до 0,1 °С, давление по вакууметру и барометру измеряют с точностью 2 кПа.

Результаты измерений занесите в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Показания термометра			Показания вакуумметра		Барометрическое давление $P_{бар}$, Па	Давление в системе (давление насыщенного пара при $T_{кип}$)	
	t , °С	T, К	11/T	кПа	ΔP , Па		$P = P_{бар} - \Delta P$, Па	ln P

На основании полученных данных необходимо:

- 1) постройте графики зависимости $P = f(T)$ и $\ln P = f(1/T)$;
- 2) вычислите теплоту испарения ($\Delta H_{исп}$) исследуемой жидкости по уравнению (1.22). Для этого выбрать на прямой, построенной в координатах $\ln P = f(1/T)$, две точки и соответствующие им координаты $(\ln P_1; 1/T_1)$ и $(\ln P_2; 1/T_2)$ подставить в уравнение (1.22);
- 3) используя зависимость $\ln P = f(1/T)$, найти графическим путем значение $\Delta H_{исп}$ (1.28); тангенс угла наклона прямой определить как отношение изменения логарифма давления к изменению обратной температуры (1.26);
- 4) рассчитать теплоту испарения, используя правило Трутона (1.30).

Полученное по уравнению (1.30) значение теплоты испарения может не совпадать с рассчитанными по пунктам 2 и 3 теплотами испарения, поскольку правило Трутона применимо только для неполярных жидкостей. Сопоставляя теплоты испарения, вычисленные различными способами, дать оценку полярности исследуемой жидкости.

Результаты вычислений теплоты испарения занесите в таблицу 1.2.



Таблица 1.2 - Результаты вычислений

Вид уравнения для расчета теплоты испарения	$\Delta H_{\text{исп}}$, Дж·моль ⁻¹
	жидкость № ____
$\Delta H_{\text{исп}} = - \frac{RT_1 T_2 \ln \frac{p_2}{p_1}}{(T_2 - T_1)}$	
Из графических построений $\Delta H_{\text{исп}} = R \cdot \text{tg } \alpha$	
$\Delta H_{\text{исп}} = 89,12 T_{\text{кип}}^{\circ}$	
Оценка полярности жидкости (качественная)	

Порядок завершения работы:

- Установите регулятор «Нагрев» в крайнее левое против хода часовой стрелки положение.
- Отключите тумблер «Нагрев».
- Выключите клавишный выключатель «Сеть».
- Плавно приоткройте пневмокран в трассе, идущей от вакуумнососа, и полностью понизьте разрежение до «0».

**Контрольные вопросы**

1. Что называется парообразованием, испарением, кипением, конденсацией?
2. От чего зависит скорость испарения жидкости?
3. Что называется удельной теплотой парообразования?
4. Как зависит температура кипения от внешнего давления?
5. Какой пар называется насыщенным?
6. Объяснить явление испарения и кипения с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
7. Почему испарение сопровождается охлаждением, а конденсация выделением теплоты?
8. Почему не повышается температура кипящей жидкости при её нагревании?
9. Выведите формулу для определения удельной теплоты парообразования.
10. Что является условием равновесия гетерогенной системы, в частности, жидкость–пар?
11. Рассмотрите диаграмму фазового состояния воды.
12. Определенное и неопределенное интегрирование уравнения Клапейрона – Клаузиуса.