

# КИПЕНИЕ ВОДЫ

## Задача

1. Измерить зависимость температуры от времени при нагревании разных объемов воды.
2. По результатам измерений определить температуру кипения воды при атмосферном давлении и удельную теплоту испарения воды.

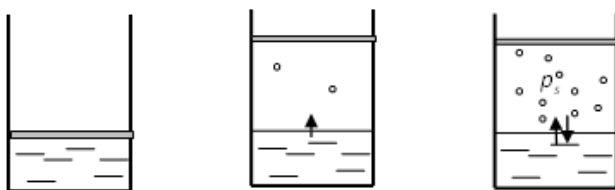
## Введение

Все вещества в зависимости от температуры и давления могут находиться в разных агрегатных состояниях – твердом, жидком, газообразном. Такое разбиение оказывается, однако, слишком грубым, поскольку многие вещества, находясь, например, в твердом состоянии, могут существовать в виде модификаций с различной структурой и свойствами. Например, углерод помимо таких известных модификаций, как аморфный углерод, графит и алмаз, может существовать еще в виде графена, фуллеренов, нанотрубок, лонсдейлита, карбина, стеклоуглерода и др. Поэтому в физике используется более общее понятие фазы - области с одинаковым составом и свойствами, отделенной от других фаз границей раздела. Разные агрегатные состояния вещества это всегда разные фазы,

обратное утверждение справедливо не всегда.

Вещество может переходить из одной фазы в другую в процессе, который называется фазовым переходом. Различают фазовые переходы первого рода, проходящие с поглощением или выделением тепла и изменением плотности вещества, и второго рода, в которых внутренняя энергия и плотность вещества не изменяются. Классическим примером фазового перехода первого рода являются испарение и конденсация, то есть переход вещества из жидкого состояния в газообразное и обратно.

Рассмотрим сосуд, в котором под поршнем находится жидкость (рис. 1). После быстрого перемещения поршня вверх молекулы начнут переходить из жидкости в пространство под поршнем, образуя там паровую (газообразную) фазу. По мере увеличения давления пара над жидкостью ускоряется и обратный процесс перехода молекул из пара в жидкость, и спустя некоторое время установится динамическое равновесие. Пар, находящийся в равновесии с жидкостью называется насыщенным.



*Рис.1 Равновесие пара в жидкости*

Число молекул, переходящих из жидкости в пар в единицу времени, будет равно числу молекул,

переходящих из пара в жидкость. Частота, с которой молекулы покидают жидкость, зависит от их распределения по энергии, то есть от температуры; частота обратного перехода пропорциональна частоте столкновений молекул пара с поверхностью жидкости, зависящей от их концентрации и скорости и, следовательно, от давления и температуры. Приравнявая количество испаряющихся и конденсирующихся молекул, находим, что давление насыщенного пара  $p_s$  зависит только от температуры.

Эту зависимость можно найти, если рассмотреть тепловую машину, работающую по циклу Карно с температурой нагревателя  $T$  и холодильника  $T-dT$ . Коэффициент полезного действия такого цикла равен

$$\eta = \frac{T_H - T_x}{T_H} = \frac{dT}{T} \quad (1)$$

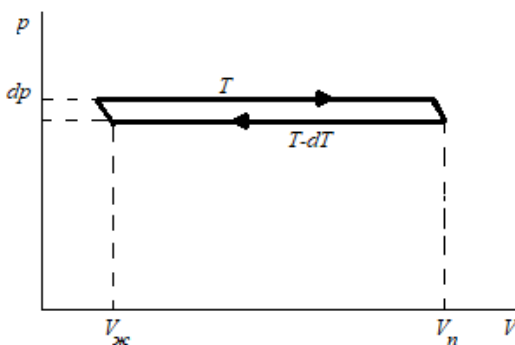


Рис.2 Цикл Карно с равновесным фазовым переходом

В изотермическом процессе получения тепла от нагревателя происходит превращение одного

килограмма жидкости объемом  $V_{ж}$  в пар объемом  $V_n$ , который затем конденсируется, отдавая почти всю полученную от нагревателя теплоту испарения  $L$  холодильнику. Поскольку в процессе испарения и конденсации пар находится в равновесии с жидкостью, его давление остается неизменным и изотермы одновременно оказываются изобарами. Работа, совершенная тепловой машиной в этом цикле равна площади фигуры, изображенной на рисунке 2. Из-за малости боковых сторон, эта площадь равна площади прямоугольника высотой  $dp$  и шириной  $V_n - V_{ж}$ . Коэффициент полезного действия рассмотренного цикла равен

$$\eta = \frac{\delta A}{Q_H} = \frac{dp(V_n - V_{ж})}{L} \quad (2)$$

Приравнявая (1) и (2) получаем уравнение Клаузиуса-Клапейрона, связывающее равновесное давление и температуру

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{(V_n - V_{ж})T} \quad (3)$$

Если давление пара не слишком велико, уравнение (3) может быть упрощено, поскольку в этом случае удельный объем пара  $V_n$  много больше, чем объем жидкости и вычитаемым  $V_{ж}$  в знаменателе можно пренебречь. Если плотность пара мала, его удельный объем  $V_n$  можно вычислить, используя уравнение состояния для одного килограмма идеального газа

$$pV = \frac{1}{M}RT$$

$$\frac{dp}{dT} = \frac{MLp}{RT^2}, \quad \frac{dp}{p} = \frac{MLdT}{RT^2},$$

$$\ln p = -\frac{ML}{RT} + \text{const}$$

Вычисляя экспоненту от обеих частей, получаем выражение для давления насыщенных паров

$$p_s = p_0 \exp\left(-\frac{ML}{RT}\right) \quad (4)$$

где  $p_0$  - константа,  $M$  - молярная масса, а  $L$  - удельная теплота испарения. Формула (4) указывает на быстрый (экспоненциальный) рост давления насыщенного пара с температурой. Равновесное давление водяного пара при  $0^\circ\text{C}$  равно 0,61 кПа, при  $100^\circ\text{C}$  возрастает более чем в 150 раз - до 101,3 кПа.

Если жидкость находится в открытом сосуде, а парциальное давление ее паров в окружающей атмосфере меньше равновесного (пар ненасыщенный), система пар-жидкость будет стремиться к равновесию и доминирующим процессом будет испарение. Вылетевшие из жидкости молекулы повышают концентрацию пара около ее поверхности, соответственно увеличивается количество молекул, возвращающихся в жидкость. Поэтому скорость испарения в большинстве случаев лимитируется скоростью отвода пара от поверхности жидкости. При отсутствии конвекции пар может отводиться

только в результате весьма медленного процесса диффузии, и скорость испарения обычно оказывается невелика.

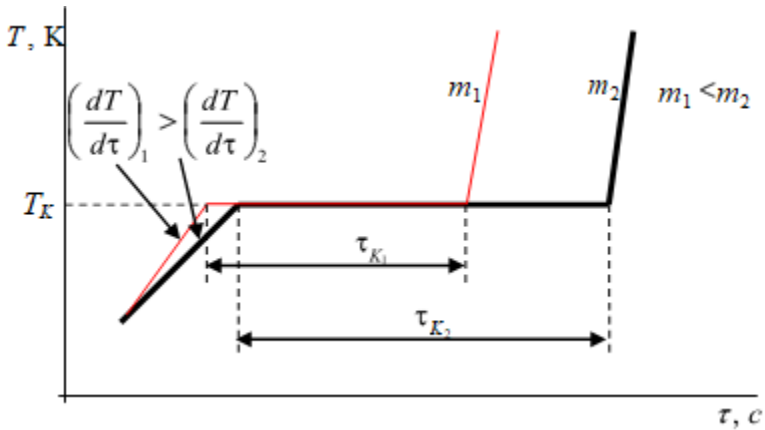
Ситуация меняется, если температура жидкости такова, что давление насыщенных паров  $p_s$  оказывается больше или равно внешнему давлению. В этом случае любой случайно образовавшийся в жидкости пузырек, заполненный насыщенным паром, будет увеличиваться в размерах, поскольку давление внутри него больше, чем снаружи. Из-за большой разницы плотностей пузырек быстро всплывает и лопается у поверхности. При большом количестве таких пузырьков скорость испарения возрастает многократно, начинается кипение жидкости. Интенсивное парообразование при кипении повышает давление у поверхности жидкости, что приводит к появлению конвективных потоков, способствующих отводу паров от поверхности. В процессе кипения жидкость находится в равновесии с паром внутри пузырьков, давление в которых примерно равно внешнему. Поэтому кипение происходит при постоянной температуре, которая может быть найдена из уравнения (4), если вместо  $p_s$  в левую часть подставить внешнее давление  $p$ . Понижение внешнего давления приводит к уменьшению температуры кипения; так, температура кипения воды при давлении вдвое меньше атмосферного равна  $82^\circ\text{C}$ .

Рассмотрим зависимость температуры от времени в процессе нагревания жидкости в открытом сосуде. Внешнее давление при этом можно считать постоянным. Подводимое к жидкости за время  $d\tau$  тепло  $dQ$  идет на испарение жидкости  $dQ = Ldm$  и на ее нагрев  $dQ_{\text{нагр}} = cmdT$ , где  $L$  – удельная теплота испарения,  $c$  – удельная теплоемкость,  $m$  – масса жидкости. Разделив уравнение теплового баланса на  $d\tau$ , получаем

$$\frac{dQ}{d\tau} = L \frac{dm}{d\tau} + cm \frac{dT}{d\tau} \quad (5)$$

В нашем эксперименте подводимая к жидкости мощность  $dQ/d\tau$  остается практически постоянной. На начальном участке нагрева испарение практически отсутствует ( $m=\text{const}$ ), поэтому первое слагаемое в (5) равно 0 и температура жидкости растет почти линейно. Как только температура достигнет значения, при котором давление насыщенного пара станет равным внешнему давлению, начнется кипение. Температура жидкости перестанет меняться, так как все подводимое тепло будет расходоваться на образование пара.

Поскольку температура при кипении постоянна ( $T_K$ ), обращается в 0 второе слагаемое в формуле (5). После испарения всей жидкости температура оставшегося пара начнет резко расти. Схематично кривые нагревания для двух масс жидкости приведены на рис.3



*Рис.3 кривые нагрева разных масс жидкости*

Зная массу и теплоемкость жидкости, по линейным участкам в начале нагрева можно определить подводимую мощность  $\frac{dQ}{d\tau} = cm \frac{dT}{d\tau}$ . Зная время кипения воды  $\tau_K$ , можно определить подводимую мощность парообразования

$$L = \frac{dQ}{d\tau} \frac{\tau_K}{m} = c \frac{dT}{d\tau} \tau_K \quad (6)$$

### **Экспериментальная установка**

Установка представляет собой нагреватель, сосуда с малой теплоемкостью, термопары и вольтметра для измерения ее термо-эдс.

Объем нагреваемой жидкости измеряется калиброванным сосудом со шкалой в миллилитрах (шприцом). Температура измеряется с помощью термопары, подключенной к вольтметру, работающему в режиме измерения температуры.





*Рис.4 Экспериментальная установка*

**Рабочая температура нагревателя около  $300^{\circ}\text{C}$ , поэтому при работе будьте аккуратны, не прикасайтесь к горячим частям.**

### **Измерения и обработка результатов**

1. Включите нагреватель, подождите 10 минут до установления теплового равновесия.
2. Проверьте, что переключатель рода работ вольтметра установлен в режим измерения температуры (TEMP).
3. Перед началом измерений подготовьте таблицу 1 для занесения данных, ручку, секундомер. Графу «ВРЕМЯ» следует уже заполнить для первой минуты с шагом 5 секунд.

Иначе можно будет не успеть записать результаты.

4. Залейте в холодный сосуд необходимый объем воды (3-5) мл с помощью шприца.

5. После установки сосуда с водой в термостат записывайте показания вольтметра в режиме измерения температуры (ТЕМП) с шагом 5 секунд до начала кипения воды.

6. После начала кипения временной шаг можно увеличить до минуты. Примерное время кипения 5 миллилитров воды равно 10 минутам.

7. Когда почти вся вода выкипит, проводите измерения с шагом 10 секунд.

**Таблица 1**

| Объем воды $V_1 = \dots$ мл |               |                                      |                     |
|-----------------------------|---------------|--------------------------------------|---------------------|
| № из м                      | Время $t$ , с | Температура $t$ , $^{\circ}\text{C}$ | Температура $T$ , К |
| 1                           |               |                                      |                     |
| ...                         |               |                                      |                     |
| N                           |               |                                      |                     |
| Объем воды $V_2 = \dots$ мл |               |                                      |                     |
| 1                           |               |                                      |                     |
| ...                         |               |                                      |                     |
| N                           |               |                                      |                     |

8. Когда температура в сосуде достигнет  $120^{\circ}\text{C}$ , выньте пинцетом сосуд и поставьте его охлаждаться на керамическое основание.

9. Повторите измерения для других объемов



12. Вычислите удельную теплоту парообразования  $L_i$  для всех объемов воды по формуле

$$L_i = ca_i\tau_{K_i}$$

и оцените погрешность  $\Delta L_i$ , используя формулу для относительной погрешности

$$\delta L = \sqrt{(\delta a)^2 + (\delta \tau_K)^2}$$

Результат запишите в таблицу 3.

При расчетах используйте среднее значение удельной теплоемкости воды в диапазоне 20 - 100 °С, равное  $4,189 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К)

13. Сравните значения, найденные для разных объемов воды. Найдите среднее значение удельной теплоты парообразования и определите его погрешность с учетом погрешности отдельных измерений

$$\Delta \langle L \rangle = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n ((L_i - \langle L \rangle)^2 + (\Delta L_i)^2)}$$

14. Вычислите среднее значение температуры кипения, оцените его погрешность.

15. Сделайте выводы по результатам работы.

### Контрольные вопросы

1. Чем различаются понятия агрегатное состояние вещества и фаза вещества?
2. Какие параметры вещества меняются скачком

при кипении?

3. Какие примеры фазовых переходов первого рода Вы можете привести?

4. Почему повышенное давление в кастрюле-скороварке ускоряет приготовление пищи?

5. Как заставить воду закипеть без подвода теплоты от внешнего источника? Будет ли меняться температура воды в этом процессе?