

## Сценарий занятия № 10 по теме *Тепловые явления, теплообмен, уравнение теплового баланса.*

### Пояснение понятий агрегатного состояния вещества и фазовых переходов.

На этапе первого знакомства с этими понятиями не углубляемся в молекулярные представления. Рассмотрение фазовых переходов пока ведётся на чисто макроскопическом и феноменологическом уровне. Ссылаемся на жизненный, "кухонный" опыт учащихся. Обещаем провести эксперименты, из которых извлечём не только качественные, но и количественные характеристики фазовых переходов в веществе.

### Обсуждение постановки эксперимента по определению теплоты парообразования при кипении.

Нам представляется, что кипение наблюдать и количественно исследовать проще, чем плавление. Поэтому начнем данный раздел с кипения. Сначала обсуждаем постановку эксперимента. Предлагается налить в стеклянную банку воды, довести воду до кипения, используя электрический нагреватель (полностью погружаемый кипятильник), начать отсчёт времени в момент закипания, продержать работающий кипятильник в кипящей воде несколько минут, затем выключить кипятильник и измерить, какая масса воды  $m_{\text{п}}$  превратилась в пар.

Забегая вперёд, объясняем, что кипятильник выделяет тепловую мощность, обозначенную на его корпусе. У нас это 0,5 кВт. Зная время действия кипятильника, можно рассчитать количество тепла  $Q_{\text{к}}$ , полученного кипящей водой. Сопоставление  $Q_{\text{к}}$  и  $m_{\text{п}}$  будет количественно характеризовать процесс фазового перехода при кипении.

Следует отметить в качестве некоторого результата, что опыт предыдущих занятий уже позволил учащимся на полном серьёзе участвовать в обсуждении постановки эксперимента. Это проявилось в том, что учащиеся сами выступили с предложениями учесть многие погрешности будущего эксперимента. Были обсуждены тепловые потери из-за отдачи тепла стенками банки в окружающую среду во время кипения воды; из-за необходимости удалить из воды кипятильник после его выключения; а если не убираем кипятильник, то вода продолжит испаряться, и мы допустим погрешность в измерении  $m_{\text{п}}$ ; массу воды мы будем определять через объём, а плотность воды зависит от температуры. Таких замечаний было много. Предложено для начала не оценивать все эти потери, а принять простейшую модель полного поглощения выделяющегося из кипятильника тепла переходящей в пар водой. Выполним эксперимент, рассчитаем экспериментальные погрешности, затем приближенно оценим потери и сравним их с погрешностями. Тогда станет ясно, нужно ли вводить поправки.

### Обработка и обсуждение результатов эксперимента.

В эксперименте зарегистрированы следующие данные. Масса воды до кипения  $m_1 = 0,175 \pm 0,004$  кг (воду набирали двумя порциями, каждый раз с погрешностью 0,002 кг). Масса воды после кипения  $m_2 = 0,110 \pm 0,002$  кг. Мощность кипятильника  $500 \pm 50$  Вт. Время кипения 300 с.

Проводим теоретический анализ нашей простой модели и приходим к заключению, что для тепла, затраченного на выкипание воды, должна иметь место формула

$$Q_{\text{к}} = Lm_{\text{п}}, \quad (1)$$

где  $L$  – удельная теплота парообразования.

Опять можно отметить в качестве некоторого результата, что учащиеся сами предлагают по данным эксперимента определить неизвестную пока величину  $L$  для воды. Что мы тут же и делаем. По расчетам получается  $L = 2,307 \cdot 10^6$  Дж/кг.

Оцениваем погрешность  $\Delta = \Delta Q/Q + \Delta m/m = 0,1 + 0,1 = 0,2$ . Отсюда  $\Delta L = 0,2 \cdot 10^6$  Дж/кг.

Теперь приходит время сказать, что не одни мы такие умные, чтобы по данным эксперимента определять величину  $L$  для воды. Многие теплотехники и физики проделали это с большой точностью сотни раз. Информация обо всех этих определениях попала в справочники, где её можно отыскать. В частности, в учебнике и в задачнике в таблицах приведена эта величина. Находим, что  $L_{\text{табличная}} = 2,3 \cdot 10^6$  Дж/кг. Видим, что расхождение составляет ничтожную долю нашей экспериментальной погрешности. По-видимому, просто повезло.

На всякий случай оцениваем, сколько тепла ушло на тепловые потери через стенки банки во время кипения. Для этого у нас есть все данные из эксперимента, проведенного на первом занятии. Мы видели, что при температуре, близкой к  $100^\circ\text{C}$ , за минуту банка остывает на  $3^\circ\text{C}$ . Отсюда уже известным способом рассчитываем, что за 5 минут наш прибор потерял  $1,5 \cdot 10^6$  Дж, то есть относительная потеря равна 0,1. Это меньше, экспериментальные погрешности, поэтому даже такую поправку вводить нет смысла, а остальные – тем более.

### **Сценарий занятия № 13 по теме *Тепловые явления, фазовые переходы.***

Данное занятие посвящено решению стандартных задач и подготовке к контрольной работе. Но среди стандартных задач показано, как решается особенная задача, приведенная в одном из задачников. Нас спрашивают:

#### **Насколько открытый стакан с водой холоднее окружающего воздуха?**

Тот, кто придумал эту задачу, безвыходно живёт в Зазеркалье. Он никогда не пробовал соотнести свои сочинения с реальной действительностью. Если исходить из известного положения, что автора сочинения надо судить по его собственным законам, то суждение будет в пользу автора этой умной задачи. В ней отражены все законы и закономерности Зазеркалья. Действительно, вода из стакана всё время потихоньку испаряется. Это требует подвода тепла от более тёплого воздуха к более холодному стакану. Следовательно, задача поставлена вполне корректно. И вполне верен для 8 класса качественный ответ: стакан чуть-чуть холоднее воздуха.

А мы с классом живём в нормальном мире. И хотим сопоставить решение данной задачи с реальной действительностью. Для доказательного и количественного, а не умозрительного решения этого вопроса необходимо собрать следующие экспериментальные данные, модельные и теоретические представления.

Если температура воды массой  $m = 0,2$  кг в стакане отличается от температуры окружающего воздуха на небольшую величину  $\Delta T$ , то за малый промежуток времени  $\Delta t$  стакан обменивается с окружающей средой количеством теплоты  $\Delta Q_1 = kmc\Delta T\Delta t$ . Эта формула следует из теории остывания тел, развитой на наших первых занятиях, когда мы убедились, что тела остывают со скоростью  $k\Delta T$ . Остаётся умножить эту скорость на

теплоёмкость воды в стакане и на промежуток времени теплопередачи. Отсюда скорость подачи тепла в прохладный стакан  $\Delta Q_1/\Delta t = kmc\Delta T$ .

Мы нашли также, что для открытого стакана  $k = 0,02 \text{ мин}^{-1}$ .

В моём собственном эксперименте, проведённом вне класса 50 мл воды испарилось полностью за 40 дней. Значит, полный стакан испарится за  $t = 160$  дней.

На испарение воды надо затратить тепла  $\Delta Q_2 = mL$ , где  $L$  - теплота парообразования. Скорость поступления тепла, идущего на испарение воды  $\Delta Q_2/\Delta t = mL/t$ .

Очевидно, что две найденные нами скорости равны, откуда получаем уравнение для определения неизвестной разности температур  $\Delta T$ .

$$mL/t = kmc\Delta T.$$

Отсюда

$$\Delta T = L/tkc.$$

Время  $t$  необходимо выразить в мин, так как  $k$  имеет размерность  $\text{мин}^{-1}$ .

Подставляем численные значения и получаем

$$\Delta T = 2,3 \cdot 10^6 / 160 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 0,02 \cdot 4,2 \cdot 10^3 = 0,119 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Теперь видно, что разницу температур между водой в стакане и окружающим воздухом в  $0,119 \text{ }^\circ\text{C}$  невозможно измерить даже точным и чувствительным термометром, имеющим цену деления шкалы  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , так как ошибка разности равна  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Опыт решения такой сложной физической задачи на уроке в 8 классе получился положительным. Учащиеся понимают все рассуждения и вычисления, поскольку на предыдущих занятиях была проделана вся подготовительная работа.

### **Сценарий занятия № 14 по теме *Тепловые явления, фазовые переходы.***

На данном занятии был опробован метод предварительной подготовки учащихся к восприятию нового экспериментального материала. На предыдущем занятии было задано познакомиться по учебнику с темой *Плавление*. Учащиеся уже изучали фазовые переходы на примере испарения, знают, что в процессе фазового перехода температура вещества не изменяется, что затраты тепла на фазовый переход пропорциональны массе вещества. То же самое характеризует и процесс плавления-кристаллизации. Есть единственная трудность в теоретической интерпретации наблюдаемых явлений: трудно понять, как это тепловая энергия тратится на разрушение кристаллической решетки. Из-за этой трудности мы переставили порядок изучения фазовых переходов – сначала изучили тему *Испарение*, так как там понятно, что на преодоление притяжения Ван-дер-Ваальса между молекулами надо затратить тепловую энергию. Теперь я решил, что мы не будем пытаться понять, почему тепловая энергия тратится на разрушение кристаллической решетки. Это мало понятно на микроскопическом уровне даже в институтском курсе физики. А на феноменологическом макроскопическом уровне достаточно усвоить формулу  $Q = \lambda m$ , где

$Q$  – теплота, необходимая для плавления массы  $m$  вещества с удельной теплотой плавления  $\lambda$ .

В надежде, что учащиеся всю эту сумму новых закономерностей как-то поймут в ходе домашних занятий, сразу приступаем к экспериментам и их обсуждению.

## **Экспериментальная часть.**

### **1. Наблюдения за температурой в ходе плавления льда.**

Этот простой эксперимент почти ничем не отличается от описанного в учебнике. Поэтому учащиеся заранее получили задание приготовить данный эксперимент. Они добыли сосульки и приготовили ёмкость с талой водой, чтобы сосульки в талой воде уже имели нужную температуру. Мы лишь наблюдаем с помощью термопары, какая температура на дне сосуда, у стенок и непосредственно под плавающими сосульками. Показания термопары варьируют от 2 до 4 °С. Пробуем объяснить эти вариации, но без особого успеха.

Вспоминаем, что точность нашей термопары не выше  $\pm 1$  °С. Вспоминаем, что температура таяния льда ровно 0 °С. Учащиеся знают и понимают, что 0 °С следует ни из какой теории, а просто произвол градуировки термометра по Цельсию. Догадываемся, что кроме погрешности шкалы  $\pm 1$  °С, наша термопара имеет систематическую погрешность + 1 °С. Это вполне соответствует паспортным данным термопары. Тем не менее ставим контрольный опыт.

У нас заготовлен термос с кубиками льда из холодильника. Заглядываем в термос и видим, что там нет ни капли воды. Значит, лед находится при температуре ниже 0 °С. Опускаем туда термопару и обнаруживаем показание + 1 °С. Учащиеся догадываются, что скорее всего в термосе температура - 1 °С. Задают умный вопрос: а рассчитана ли эта термопара на отрицательные температуры? Приходится честно отвечать – не известно, в паспорте ничего про это не сказано.

Возвращаемся к сосуду с тающими сосульками и добавляем туда несколько кубиков льда. Продолжаем измерять температуру, зная теперь о сдвиге нуля термопары. А что, если сунуть в воду палец? Термопара, естественно, не реагирует на опущенный палец. Почему? Начинается некоторая фантастика и путаница.

Заостряем вопрос. Для этого опускаем в сосуд кипятильник и включаем его на короткое время. Опять никакой реакции со стороны термопары, если не считать вариаций в 1 °С. Учащиеся знают, что включённый кипятильник выделяет тепло. Куда оно девается? Находится учащийся, знающий ответ – тепло идёт на разрушение кристаллической решетки льда. Значит, читали и что-то поняли.

Таким образом, из данного эксперимента мы видим, что реальная действительность выглядит не так просто, как это изображено в учебнике. Но теория и опыт, накопленный в экспериментах по кипению, позволяет нам разобраться в этой реальности.

### **2. Наблюдения за теплообменом в ходе плавления льда.**

Предлагается провести количественный калориметрический эксперимент с участием тающего льда. Этот эксперимент также подобен описанному в учебнике, но мы учтём больше факторов, чем сделано в учебнике.

Нальём в знакомую нам по предыдущим экспериментам стеклянную банку, выполняющую у нас роль калориметра, воды массой  $m_{\text{в}} = 0,125$  кг при температуре  $T_1 = 17$  °С. Замечаем, что вода занимает половину объёма банки. Когда мы бросим в банку два кубика льда, предварительно подтаявшего в талой воде, уровень воды в банке заметно не изменится. Это даёт нам право считать, что в теплообмене будет участвовать только половина массы стекла  $0,5m_{\text{с}}$  банки. Ждем, пока весь лёд растает. На это уходит примерно  $t = 30$  мин. Температура при этом опустилась до  $T_2 = 6$  °С. По ходу дела замечаем, что банка в нижней части стала какой-то мутной. Это почему-то сильно беспокоит весь класс. Разглядываем банку и видим, что она запотела там, где сейчас находится холодная вода. Объясняем это новое явление: роса конденсируется из пара, растворённого в воздухе. При этом становится ясно, что выделяющаяся при конденсации тепловая энергия как-то попадает в воду. Следовательно, мы не можем не учитывать приток тепла из окружающей среды в процессе таяния льда.

Составляем уравнение теплового баланса, из которого попытаемся предсказать конечную температуру  $T_2$  нашего прибора.

$Q_{\text{л}} = \lambda m_{\text{л}}$  – это количество теплоты потребляет тающий при температуре плавления лед.

$Q_{\text{п}} = (c_{\text{в}}m_{\text{в}} + c_{\text{с}}0,5m_{\text{с}})(T_1 - T_2)$  – это количество теплоты отдаёт наш остывающий прибор.

$Q_{\text{е}} = (c_{\text{в}}m_{\text{в}} + c_{\text{с}}0,5m_{\text{с}})k(T_{\text{е}} - T_2)t$  – это количество теплоты отдаёт нашему остывающему прибору окружающая среда, имеющая температуру  $T_{\text{е}} = 23$  °С. Коэффициент скорости остывания открытого прибора, наполовину заполненного водой,  $k = 0,02$  мин<sup>-1</sup>. Этот коэффициент мы определяли в опытах по остыванию горячего прибора, но мы верим, что такая же закономерность проявляется и при передаче тепла от воздуха к холодному прибору. Конечно,  $Q_{\text{е}}$  в такой модели рассчитывается очень неточно, так как температура прибора не всё время одинакова. Нас оправдывает то, что вначале таяния льда температура падала очень быстро, а потом долго держалась около 6 °С. Ещё одна неточность связана с появлением росы. Этот механизм теплопередачи отсутствовал в опытах с горячим прибором. Значит, величина  $k$  у нас менялась в ходе опыта. Нас оправдывает то, что роса появилась только в самом конце опыта.

Для выполнения всех расчётов нам ещё нужно знать массу льда  $m_{\text{л}}$ , которую мы находим по приращению объёма воды. Получается  $m_{\text{л}} = 0,030$  кг.

Расчёт температуры  $T_2$  предлагаем сделать, пользуясь двумя моделями. Сначала не будем учитывать поступления теплоты  $Q_{\text{е}}$  от окружающей среды. Так делается во всех учебниках. Получается уравнение  $\lambda m_{\text{л}} = (c_{\text{в}}m_{\text{в}} + c_{\text{с}}0,5m_{\text{с}})(T_1 - T_2)$ , откуда

$$T_2 = T_1 - \lambda m_{\text{л}} / (c_{\text{в}}m_{\text{в}} + c_{\text{с}}0,5m_{\text{с}}). \quad (1)$$

Подставляем наши данные и получаем  $T_2 = -0,3$  °С. То есть весь прибор должен охладиться ниже точки замерзания воды. Это полная ерунда с физической точки зрения. Детям это совершенно ясно безо всякого разжевывания.

Мы понимаем, что расплачиваемся за слишком большое упрощение модели. Уже ясно, что приток тепла от окружающей среды играет самую заметную роль. Только благодаря этому притоку у нас прибор остался достаточно тёплым (6 °С), чтобы весь лёд смог растаять. Подсчитаем отдельно поступление теплоты  $Q_{\text{е}}$  от окружающей среды. Получается  $Q_{\text{е}} = 6011,42$  Дж. Введём эту поправку в числитель в формуле (1). Тогда



получим  $T_2 = 9,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это уже значительно лучше согласуется с экспериментом. Во всяком случае, это разумная физическая величина. Расхождение с экспериментом составляет  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Пробуем уточнить поправку на поступление теплоты  $Q_e$  от окружающей среды. Мы рассчитывали эту поправку, считая, что прибор все 30 мин был максимально холодным. Но это не так. Предположим, что температура прибора со временем падала равномерно. Тогда в наш прибор поступила только половина от рассчитанной нами  $Q_e$ , то есть 3000 Дж. Если ввести в (1) такую поправку, то получится  $T_2 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это настолько близко к эксперименту, что нет нужды оценивать погрешность нашего расчета по уточнённой модели.

Вместе с учащимися делаем важный вывод: *сильны мы, бродяги. Как физики.*

### **Общий вывод из опыта занятий по разделу программы Теплота.**

В особых условиях (в 8 классе всего 12 человек, и это специально отобранные учащиеся) затеянный мной методический эксперимент можно считать полностью удавшимся. За полгода учащиеся превратились из фантазёров в маленьких физиков, понимающих, что такое физический эксперимент, модель, теория, сопоставление теории с опытом с учётом погрешностей измерения и модели. Они вполне проявили способность обсуждать постановку и интерпретацию физического эксперимента, простейшие эксперименты уже предлагают сами. Их нисколько не удивляет и не смущает атмосфера исследовательской работы во время занятия. А ведь мы полгода занимались тем, что называют наукой – наблюдали явления, не описанные в учебниках, и находили из решения обратных задач параметры этих явлений. Будучи нормальными учёными, мы проверяли работоспособность вновь найденных параметров в контрольных опытах. Осталось опубликовать результаты в научной периодике. Конечно, всё пока зыбко, но у нас впереди возможность закрепить полученные практические навыки.