

7-9 классы, подготовка к теоретическому туру  
олимпиады школьников «Робофест» по физике

Теоретический обзор к вводному занятию 6.

Тема: «СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА, ТЕПЛОБМЕН И ИЗМЕНЕНИЯ АГРЕГАТНЫХ  
СОСТОЯНИЙ».

Все вещества состоят из молекул, которые находятся в постоянном движении, которое называют «тепловым движением». Молекулы очень малы – «обычный» размер молекул от  $10^{-10}$  м до  $10^{-9}$  м. Массы молекул также очень малы: в таблице элементов Менделеева, которую изучают в школьном курсе химии, массы атомов, из которых состоят молекулы, указаны в «углеродных» атомных единицах массы (а.е.м.). 1 а.е.м.  $\approx 1,66 \cdot 10^{-24}$  г. Все свойства вещества зависят от строения молекул, их расположения относительно друг друга, взаимодействие и движение. Например, в газах молекулы находятся на расстояниях, значительно превышающих их размеры, и большую часть времени почти не взаимодействуют (точнее, они взаимодействуют только в «редкие» для себя моменты соударений). В жидкостях и твердых телах молекулы «прижаты» друг к другу.

**Пример 1.** Сравним количество молекул в 1 л воздуха и в 1 л жидкой воды. Примем, что масса молекулы воздуха равна 29 а.е.м. (на самом деле воздух в основном состоит из азота – 78%, масса молекулы 28 а.е.м. – и кислорода – 21 %, масса молекулы 32 а.е.м., поэтому и вводят такую «среднюю» массу «молекулы воздуха»), масса молекулы воды равна 18 а.е.м., плотность воздуха при «комнатных» условиях (давление равно нормальному атмосферному, температура 24°C) равна  $1,2 \text{ кг/м}^3$ , плотность жидкой воды  $10^3 \text{ кг/м}^3$ .

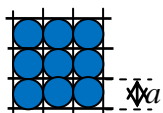
Так как  $1 \text{ м}^3 = 1000 \text{ л}$ , то масса одного литра воздуха равна  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ , а масса одной молекулы воздуха 29 а.е.м.  $\approx 4,8 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ . Поэтому число молекул в одном литре воздуха примерно равно

$$N_1 \approx \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{4,8 \cdot 10^{-26}} = 2,5 \cdot 10^{22}!$$

Масса 1 л воды равна 1 кг, а масса молекулы воды – 18 а.е.м.  $\approx$

$3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ , так что в 1 л воды молекул более чем в 1000 раз больше:  $N_2 \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{-26}} \approx 3,3 \cdot 10^{25}$ .

**Пример 2.** Поскольку в жидкой воде молекулы прижаты друг к другу, предыдущий результат позволяет нам оценить размер молекулы воды: если упаковать в кубический ящик со стороной  $L$  шарики радиусом  $a$ , сложив их одинаковыми слоями в «кубическом» порядке (см. рисунок, на котором изображен «один слой»), то



в ящике поместится  $N = \left(\frac{L}{a}\right)^3$  шариков, то есть  $a = \frac{L}{\sqrt[3]{N}}$ . Значит, размер молекулы воды

(литр – это объем куба со стороной 10 см):  $a = \frac{10 \text{ см}}{\sqrt[3]{3,3 \cdot 10^{25}}} \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ . У воздуха размеры

молекул значительно меньше, чем расстояния между ними, поэтому аналогичное вычисление позволяет нам оценить среднее расстояние между молекулами воздуха при «комнатных»

условиях:  $l = \frac{10 \text{ см}}{\sqrt[3]{2,5 \cdot 10^{22}}} \approx 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ см}$ .

Движение молекул из-за непрерывных столкновений носит хаотический (совершенно беспорядочный) характер. С помощью микроскопа (в который сами молекулы увидеть нельзя) можно наблюдать броуновское движение – «беспорядочные» дергания мелких частичек в жидкости под действием ударов молекул. «Нагретость» вещества, которую мы описываем с помощью понятия температуры, зависит именно от скорости движения молекул. В самом деле, при измерении температуры тела мы приводим его в контакт с «термометром» (это тело, по «внешнему виду» которого – например, по высоте столбика ртути в трубочке – можно судить о температуре) и ждем установления теплового равновесия. Тепловое равновесия тел достигается, когда «теплота» перестает перетекать от одного тела к другому. На самом деле при контакте тел происходят соударения их молекул, которые обмениваются

энергией. Пока энергия движения (в физике она называется *кинетической энергией*) одних молекул больше, чем у других, они в основном отдают ее, а те, у которых она меньше – принимают. Значит, в состоянии теплового равновесия у тел выравниваются средние кинетические энергии молекул! Таким образом, температура – это величина, однозначно связанная со средней кинетической энергией молекул, а передача тепла от одного тела к другому при их контакте – результат обмена энергией между огромным количеством взаимодействующих молекул тел. Такой механизм теплопередачи называют **теплопроводностью**. Теперь мы должны понимать, что теплота – это форма энергии, и поэтому **количество теплоты** измеряется в тех же единицах, что и энергия – в джоулях. Обычно количество теплоты в физике обозначают символом  $Q$ . Теплопроводность подчиняется закону Фурье: поток тепла через единицу площади слоя вещества (это количество теплоты, проходящее через эту площадь в единицу времени) пропорционален разности температур по разные стороны от этого слоя и обратно пропорционален толщине слоя. Коэффициент пропорциональности зависит в основном от вещества (материала слоя).

**Пример 3.** Допустим, что два слоя теплоизоляции изготовлены из одного материала, но внешний имеет в три раза большую толщину. Между слоями, внутри и снаружи – вещество, которое очень хорошо проводит тепло. Температура внутри равна  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , а снаружи  $t_2 = 4^\circ\text{C}$ , и эти температуры постоянны. Какова температура вещества между слоями?

Здесь важно понять, что в ситуации, когда по разные стороны от слоя теплоизоляции (которая, конечно же, сделана из материала, который плохо проводит тепло) поддерживается постоянная разность температур, то через него течет постоянный поток тепла. В нашем случае одинаковый поток течет через оба слоя (изнутри, где температура выше, наружу), и, с учетом закона Фурье должно выполняться равенство  $\frac{1}{3}(t - t_2) = t_1 - t$ , где  $t$  – искомая температура вещества между слоями (ее

мы считаем постоянной, так как это вещество по условию очень хорошо проводит тепло, и даже небольшая разность температур означала бы очень большой поток тепла). Из этого уравнения

находим:  $t = \frac{3t_1 + t_2}{4} = 16^\circ\text{C}$ .

Есть и другие механизмы теплопередачи. Например, плотность многих веществ изменяется при изменении температуры. Большинство обычных веществ расширяются при нагревании (более быстродвигающиеся молекулы «расталкивают» друг друга и расходятся на большие расстояния), и их плотность падает. Поэтому в поле тяжести земли более холодные газы или жидкости опускаются вниз, а более горячие – поднимаются вверх. Вместе с *переносом массы* (его называют **конвекцией**) происходит и конвективный *перенос тепла*.

Кроме того, все нагретые тела излучают **электромагнитные волны** – радиоволны, тепловое излучение, свет и так далее. На самом деле есть и другие виды излучений (например, **радиоактивные излучения**), но они характерны для особых веществ, а электромагнитное излучение может испускать любое «обычное» вещество. Это тоже вид энергии, и тело, испускающее излучение без «подогрева», охлаждается. Другое тело, поглощающее излучение, может за счет него нагреваться. При небольших температурах (около  $0^\circ\text{C}$ ) эти излучения очень слабы, и не играют значительной роли в теплопередаче, но с ростом температуры роль этого канала очень быстро возрастает. Сидя у камина или около стены разогретой печи, можно почувствовать поток «лучистой» энергии.

Отметим еще один важный факт. Поскольку, как мы уже поняли, изменение температуры пропорционально изменению средней кинетической энергии молекул тела, то количество теплоты, которое необходимо передать телу для увеличения его температуры, должно быть пропорционально изменению температуры и количеству молекул тела. Количество молекул тела, сделанного из определенного вещества, пропорционально его массе. Поэтому количество теплоты пропорционально произведению массы тела на разность конечной и начальной температур, а коэффициент пропорциональности зависит от материала тела. Этот коэффициент называют удельной теплоемкостью вещества и обозначают символом  $c$ . Итак,  $Q = c \cdot m \cdot (t_k - t_n)$ . Если конечная температура *ниже* начальной (тело *охлаждается*), то эта формула приведет нас к результату, что тело «получает» отрицательное количество теплоты. Конечно, это мы должны понимать как то, что тело *отдает* такое же по абсолютной величине количество теплоты при охлаждении. Произведение удельной теплоемкости на

массу вещества называют просто «теплоемкостью» соответствующего тела:  $C = c \cdot m$ , и  $Q = C \cdot (t_k - t_n)$ . Для тел со сложным составом (из разных веществ) проще вводить именно теплоемкость как коэффициент пропорциональности между количеством тепла и изменением температуры для данного тела.

**Пример 4:** 1 литр воды нагрели от  $20^\circ\text{C}$  до  $40^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты ей было сообщено? Удельная теплоемкость воды равна  $4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ .

Ясно, что масса воды равна 1 кг. Надо сразу воспользоваться формулой:

$$Q = c \cdot m \cdot (t_k - t_n) = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1 \text{ кг} \cdot (40 - 20)^\circ\text{C} = 84 \text{ кДж}.$$

В более сложных примерах на основе этой формулы можно составлять уравнения:

**Пример 5:** В термосе содержится  $M = 200$  г воды с температурой  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Туда бросают оловянного солдатика массой  $m = 40$  г, нагретого до  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ . Какая температура будет у содержимого термоса после установления равновесия? Удельная теплоемкость воды равна  $c_1 = 4,2 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot ^\circ\text{C})$ , удельная теплоемкость олова  $c_2 = 0,23 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot ^\circ\text{C})$ , теплоемкостью термоса можно пренебречь.

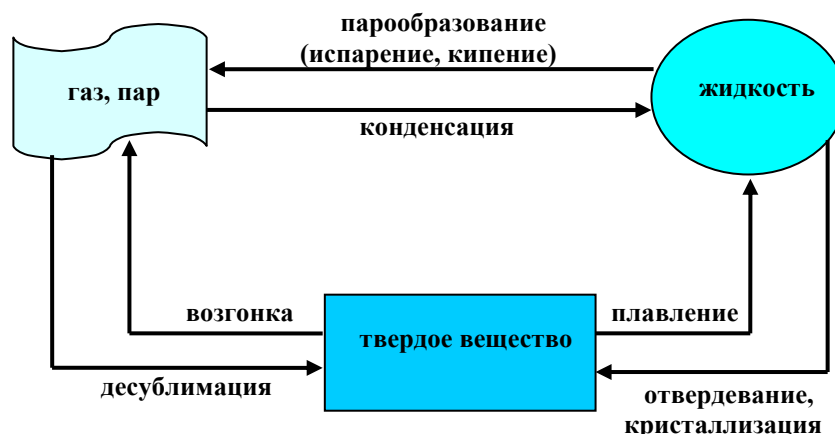
В самом деле, вода нагревается от  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до конечной температуры  $t$ , получая тепло. Это же количество теплоты отдает оловянный солдатик, остывая от  $t_2 = 50^\circ\text{C}$  до  $t$ . Значит,

$$c_1 \cdot M \cdot (t - t_1) = c_2 \cdot m \cdot (t_2 - t), \text{ откуда следует, что } t = \frac{c_1 M t_1 + c_2 m t_2}{c_1 M + c_2 m} \approx 20,3^\circ\text{C}.$$

за небольшой массы и низкой удельной теплоемкости олова, вода почти не нагрелась.

Уравнения, подобные тем, что мы использовали в этом примере, называют **Уравнениями Теплового Баланса**. В общем случае оно записывается следующим образом: в теплоизолированной системе сумма выделившихся (отданных) количеств теплоты равна сумме поглощенных (полученных). Для составления такого уравнения нам нужно четко разделять процессы, приводящие к выделению или поглощению тепла.

Вещества, как мы знаем, могут находиться в различных *агрегатных состояниях*: в школе изучают газообразное, жидкое и твердое состояние. Возможные переходы между ними показаны на диаграмме:



При каждом таком переходе изменяется относительное расположение молекул, и, как следствие – энергия их взаимодействия. Поэтому при каждом переходе молекулы отдают или получают энергию, которую мы считаем выделяемым или поглощаемым количеством теплоты. Величина этого количества теплоты пропорциональна количеству молекул, изменивших свою энергию, то есть массе вещества. Поэтому для описания «энергетики» перехода вводят **удельную теплоту перехода** – количество теплоты, отдаваемой (поглощаемой) единицей массы данного вещества, совершающего этот фазовый переход при неизменной температуре. Тогда формула для количества теплоты, выделившейся (поглощенной) при переходе, записывается так:  $Q = \lambda \cdot \Delta m$ . Удельные теплоты противоположных процессов равны (например, удельная теплота плавления равна удельной теплоте кристаллизации и т.д.). Аналогично фазовым переходам можно рассматривать и химические реакции (например, сгорание топлива), идущие с выделением (экзотермические)

или поглощением (эндотермические) тепла. Для них вводят удельную теплоту реакции (например, удельную теплоту сгорания топлива):  $Q = q \cdot m$ . Если фазовый переход не происходит, то говорят, что агрегатные состояния вещества находятся *в равновесии*. Как правило, равновесие двух (или даже трех) агрегатных состояниях возможно только при определенных сочетаниях давления и температуры. Например, устойчивое равновесие льда и жидкой воды при нормальном атмосферном давлении возможно только при  $t = 0^\circ\text{C}$ . На самом деле именно это равновесие было выбрано для определения нуля шкалы температур Цельсия!

Перечислим разные процессы, сопровождающиеся выделением и поглощением тепла:

ВЫДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА	ПОГЛОЩЕНИЕ ТЕПЛА
остывание вещества от $t_H$ до $t_K$ : $Q = cm(t_H - t_K)$	нагревание вещества от $t_H$ до $t_K$ : $Q = cm(t_K - t_H)$
фазовый переход массы $\Delta m$ вещества: $Q = \lambda \Delta m$ для конденсации, отвердевания.	фазовый переход массы $\Delta m$ вещества: $Q = \lambda \Delta m$ для парообразования, плавления.
Экзотермическая реакция с расходом реагента $m$ : $Q = qm$	Эндотермическая реакция с расходом реагента $m$ : $Q = qm$

**Пример 6:** В кастрюле находились  $M_1 = 500$  г воды и  $M_2 = 100$  г льда в равновесии. Кастрюля стоит на газовой плите. Какую массу природного газа нужно сжечь, чтобы растопить лед и нагреть воду до температуры  $t = 20^\circ\text{C}$ ? Удельная теплота плавления льда  $\lambda = 340$  Дж/г, удельная теплота сгорания природного газа  $q = 44$  кДж/г. Считать, что содержимое кастрюли получает 50% от количества теплоты, выделяющегося при сгорании газа.

Поскольку вначале вода и лед были в кастрюле в равновесии, то их температура была равна  $0^\circ\text{C}$ . На плавление льда нужно израсходовать  $Q_1 = \lambda M_2 = 34$  кДж. Затем общую массу воды нужно нагреть от  $0^\circ\text{C}$  до  $t = 20^\circ\text{C}$ :  $Q_2 = c \cdot (M_1 + M_2) \cdot t = 50,4$  кДж. При сгорании газа, в соответствии с условием, должно выделиться в два раза большее количество теплоты. Итак, уравнение теплового баланса  $Q_1 + Q_2 = \lambda M_1 + c \cdot (M_1 + M_2) \cdot t = 0,5 \cdot qm$  позволяет найти требуемую массу газа:  $m = 2 \frac{\lambda M_1 + c \cdot (M_1 + M_2) \cdot t}{q} \approx 3,8$  г.

#### Общая схема решения задач с использованием УТБ:

**Шаг 0:** Определить характер описанных в условии процессов, определить, какие из них идут с выделением, а какие – с поглощением тепла (см. таблицу ниже).

**Шаг 1:** Записать для всех этих процессов выражение для количества выделенного (поглощенного) тепла. Определить (если это возможно) конечное состояние системы, если невозможно – выбрать «разумное» предположение о характере этого состояния

**Шаг 2:** Записать уравнение теплового баланса: в замкнутой системе сумма выделившихся количеств тепла равна сумме поглощенных.

**Шаг 3:** Из этого уравнения выразить искомую величину, проверить (если нужно) справедливость предположения о конечном состоянии.