

**Федеральное агентство по образованию  
Федеральная заочная физико-техническая школа  
при Московском физико – техническом институте  
(государственном университете)**

**ФИЗИКА**

**Тепловые явления**

Задание №2 для 8-х классов

(2005-2006 учебный год)



г. Долгопрудный, 2005

*Составитель:* С.Д. Кузьмичев, доцент кафедры общей физики МФТИ.

Физика: задание №2 для 8-х классов (2005-2006 учебный год). - М.: МФТИ, 2005, 20с.

**Дата отправления заданий по физике и математике – 23 декабря 2005г.**

Составитель:

**Кузьмичев Сергей Дмитриевич**

Изд. лиц. №040060 от 21.08.96г. Подписано 07.10.05

Формат 60x90 1/16. Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,25

Уч.-изд. л. 1,11. Тираж 1800. Заказ №7-з.

Заочная физико-техническая школа  
Московский физико-технический институт  
(государственный университет)  
«ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ»

141700, Москов. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9  
ЗФТШ при МФТИ, тел/факс (095) 408-5145 – **заочное отделение**  
тел./факс (095) 485-4227 – **очно-заочное отделение**  
тел.409-9583 – **очное отделение**

***E.mail:* [zftsh@pop3.mipt.ru](mailto:zftsh@pop3.mipt.ru)**

**Наш сайт: [www.school.mipt.ru](http://www.school.mipt.ru)**

© ЗФТШ при МФТИ, 2005

## Тепловые явления.

### Введение.

Физические процессы, протекающие в телах при их нагревании или охлаждении, принято называть тепловыми явлениями. Нагревание и охлаждение воздуха, таяние льда, плавление металлов, кипение воды – вот некоторые примеры тепловых явлений.

Исторически сложилось так, что тепловые явления изучаются двумя разделами физики: термодинамикой и молекулярной физикой. Эти разделы физики отличаются друг от друга различным подходом к изучаемым явлениям. Однако, они не противоречат, а взаимно дополняют друг друга.

Уже в Древней Греции люди пытались объяснить природу теплого и холодного, наделяя каждое тело определенным количеством некоей субстанции (вещества), которую они называли "огнем". Больше всего "огня" при этом, по их воззрениям, находилось в пламени, меньше всего – во льду. Например, нагревание холодного тела горячим телом они пытались объяснить переходом "огня" от теплого предмета к холодному. Представления древних греков о сущности теплого и холодного были возрождены наукой средних веков в гипотезе о теплороде или флогистоне. Отголосок этих воззрений сохранился в изменившемся виде в физике до сих пор в той терминологии, которую она использует при объяснении тепловых явлений, т.е. в словах и выражениях, хотя смысл слов стал иным.

Термодинамика или общая теория теплоты является аксиоматической наукой. В её основе лежат общие принципы или, как их называют по-другому, начала, являющиеся обобщением опытных данных. Теплота при этом рассматривается как род некоторого внутреннего движения, но что это за движение, какова его природа, термодинамика не конкретизирует.

Это неумение термодинамики вскрыть природу теплоты заставило физиков 19-го века попытаться построить молекулярно-кинетическую теорию так, чтобы она могла давать правильные не только качественные, но и количественные ответы.

Молекулярная физика исходит из представления об атомно-молекулярном строении вещества и рассматривает теплоту как непрерывное беспорядочное движение атомов и молекул. Молекулярно-кинетическая теория, в принципе, позволяет дать объяснение любому тепловому процессу или явлению.

Большинство вопросов, затронутых в этом задании, будут изучаться с термодинамической точки зрения, но при этом будут привлекаться также и молекулярно-кинетические представления.

#### Температура и тепловое равновесие.

При изучении тепловых явлений вводится новая физическая величина — температура. Понятие температуры вошло в физику из бытовых представлений теплого и холодного посредством нашего чувственного восприятия степени нагретости тел. Однако, наши ощущения неоднозначны и зависят от состояния человека и окружающей среды. Так, например, в одной и той же комнате металлические предметы кажутся всегда более холодными, чем деревянные или пластмассовые. Рукой можно грубо отличить холодную воду от горячей, однако мы знаем, что при этом нетрудно и ошибиться. Прodelайте такой опыт. Одну руку опустите в холодную воду, а другую - в горячую, подержите некоторое время. Затем опустите одновременно обе руки в сосуд с теплой водой. Та рука, которая была до этого в горячей воде, почувствует холод, рука же, бывшая до этого в холодной воде, ощутит жар. Этот опыт показывает, что наши ощущения, обычно надежные, могут оказаться ошибочными, и, поэтому, желательнее иметь такой способ измерения температуры, который не зависел бы от наших ощущений и от нашего настроения.

В физике к понятию температуры приходят через понятие теплового равновесия. Рассмотрим пример. Пусть в сосуд с холодной водой опускается сильно нагретая стальная деталь, т.е. в контакт приводятся тела, имеющие разные температуры. Опыт показывает, что одно тело (вода) при этом будет нагреваться, а другое (стальная деталь) — охлаждаться. При этом можно наблюдать и видимые признаки изменения состояния тел: раскаленная "до красна" деталь изменит свой цвет, вода закипит и т.д.. Через некоторое время процессы нагревания и охлаждения прекратятся. Перестанут быть заметными и всякие видимые изменения в состоянии тел. Тогда говорят, что эти два тела (в рассматриваемом примере — вода и стальная деталь) находятся в тепловом равновесии и имеют одинаковые температуры. Тепловое равновесие, как показывает опыт, устанавливается не только в случае соприкосновения двух, но и в случае соприкосновения нескольких тел.

### Термоскопы и термометры.

Для суждения об одинаковости или различии температур двух тел А и В нет необходимости обязательно приводить их в тепловой контакт друг с другом. Можно для этой цели воспользоваться третьим телом С, приводимым последовательно в контакт с телами А и В. В основе этого способа сравнения температур лежит следующий опытный факт.

Если тело С находится в тепловом равновесии с телами А и В, то тела А и В, приведенные в контакт друг с другом, также будут находиться в тепловом равновесии. Иными словами, если температура тела С равна температурам тел А и В, то тела А и В имеют одну и ту же температуру, равную по определению температуре тела С.

Достаточно малое тело С, служащее для установления одинаковости или различия температур двух или нескольких тел, называется термоскопом. Малость тела существенна. В противном случае термоскоп заметно искажал бы температуру испытываемого тела.

О постоянстве или изменении температуры термоскопа можно судить по изменению различных величин, характеризующих его физические свойства. Опыт показывает, что практически все физические свойства тел изменяются при изменении температуры. Так, при нагревании большинство тел расширяются, т.е. увеличивается их объем. Исключение составляет вода в интервале температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $4^{\circ}\text{C}$ .

Явление расширения тел при нагревании может быть использовано для построения термоскопа. Обыкновенный жидкостной термоскоп состоит из стеклянной трубочки с колбочкой на конце, частично заполненной ртутью или какой-либо другой жидкостью. Из-за того, что ртуть при нагревании расширяется сильнее, чем стекло, столбик ртути поднимается или опускается при погружении термоскопа в теплое или холодное вещество. Термоскоп позволяет убедиться в равенстве или различии температур двух тел.

Еще давно врачами было замечено, что, если больные ощущают жар, то это характеризует их плохое самочувствие. Когда врачи поняли это, они пытались при обследовании пациентов как-то "измерять" их температуру. При этом использовались стеклянные трубки, заполненные до определенного уровня водой, ртутью или подкрашенной жидкостью. Врачи считали, что чем выше поднимается жидкость, тем выше температура больного. Поскольку на термометрах не было одинаковых шкал, врач сравнивал температуру своего тела с температурой пациента и приходил, конечно, к определенному "научному" заключению о состоянии здоровья больного.

С развитием промышленности и научных исследований появилась потребность измерять температуру количественно, т.е. приписывать температуре определенные числа (ввести температурную шкалу). Галилей, Торичелли, Герике и многие другие их современники стремились построить термометры – устройства для измерения температуры; в основу работы термометров они положили тепловое расширение жидкостей и газов, которым в большинстве случаев пользуются и сейчас. Правда, в этих первых термометрах не были устранены многие побочные явления, например, влияние давления воздуха, и поэтому они давали лишь условно применимые результаты. Приходилось также сталкиваться с техническими трудностями согласования показаний термометров одной и той же конструкции. Первым, кто преодолел эти трудности, стал Габриэль Даниэль Фаренгейт (1686-1736), работы которого относятся к 1709 г. Конструкция термометра, разработанная Фаренгейтом, применяется и теперь в комнатных термометрах.

В качестве двух фиксированных точек на своей температурной шкале Фаренгейт выбрал два уровня столбика ртути, один из которых соответствовал, видимо, температуре тела человека ( $100^{\circ}F$  – сто градусов по шкале Фаренгейта), а другой ( $0^{\circ}F$ ) соответствовал наименьшему уровню, до которого опустился ртутный столбик в одну из холодных зим в то время. Расстояние между этими точками он разделил на 100 равных частей, каждую из которых назвал градусом. С помощью такого термометра, показывающего  $212^{\circ}F$  при кипении и  $32^{\circ}F$  при замерзании воды, он обнаружил, что различные жидкости кипят при различных, но фиксированных температурах.

Использование термометров конструкции Фаренгейта в исследовании тепловых явлений позволило установить и другие постоянные метки (реперные точки) на температурной шкале. Оказалось, что такими точками являются температуры перехода вещества из твердого состояния в жидкое и из жидкого состояния в газообразное при одних и тех же внешних условиях, например, температуры плавления (таяния) льда и кипения воды.

Андрес Цельсий (1701-1744) в качестве нулевой отметки на шкале своего термометра взял уровень ртути, соответствующий температуре кипения воды, а через 100 обозначил уровень, отвечающий температуре таяния льда. Разделив этот интервал на 100 равных частей, Цельсий получил стоградусную шкалу, называемую теперь его именем ( $C$ ). Известный шведский ботаник Карл Линней пользовался термометром с переставленными значениями реперных точек: 0 означал температуру плавления льда, 100 – температуру кипения воды. Таким образом,

современная шкала Цельсия по существу является шкалой Линнея.

В современной физике широко используется температурная шкала по Кельвину (К). Температурный интервал между точками плавления льда и кипения воды разделен в ней на 100 равных частей, а температуры плавления льда и кипения воды равны соответственно 273,15 К и 373,15 К.

Внутренняя энергия тела. Теплота и работа.

Существует много способов изменить температуру тела. В одном из таких способов температуру тела меняют, нагревая его в пламени сгорающего топлива. При этом говорят, что тепло, выделяющееся при сгорании топлива, пошло на нагревание тела. Такая терминология появилась примерно в восемнадцатом веке, когда считалось, что в каждом теле содержится некая субстанция, называемая теплородом. Считалось, что частицы теплорода отталкиваются друг от друга, но притягиваются частицами обычных веществ. Если тело увеличивает содержание теплорода (тепла), то температура тела увеличивается. Если количество теплорода уменьшается, то температура тела падает. Хотя предмет может казаться холодным, это не значит, что он не содержит тепла. Например, кусок льда способен нагреть кусок сухого льда, причем сам он будет при этом охлаждаться. Теория, описывающая теплоту в виде материальной субстанции (теплорода), получила название материальной теории теплоты или теории теплорода.

Хотя эта теория давно уже оставлена, некоторые ее термины сохранились в современной науке о теплоте, особенно в тех ее разделах, где рассматриваются потоки и перенос тепла. Мы по-прежнему говорим, что тепло течет, а тело поглощает тепло. Это приводит к некоторой путанице, поскольку мы говорим о теплоте как о какой-то субстанции, даже если мы знаем, что на самом деле это не так.

Понять физическую природу теплоты в термодинамике невозможно без привлечения атомно-молекулярных представлений о строении вещества.

С молекулярной точки зрения любое тело состоит из громадного числа мельчайших частиц, называемых молекулами и атомами. Эти частицы находятся в непрерывном тепловом движении. Процесс нагревания тела в пламени сгорающего топлива выглядит следующим образом. Горение есть химическая реакция соединения двух веществ (обычно кислорода и горючего) и образования новых веществ. Кинетическая энергия молекул продуктов горения при этом во много раз превосходит первоначальную кинетическую энергию исходных веществ.

Образовавшиеся при горении молекулы бомбардируют молекулы вещества, помещенного в пламя горелки. Кинетическая энергия молекул вещества меньше кинетической энергии молекул пламени. При столкновении этих молекул часть энергии молекул пламени переходит молекулам вещества и энергия этих молекул увеличивается, а молекул пламени уменьшается. Процесс нагревания всегда сопровождается повышением температуры тела. Это позволяет сделать вывод, что увеличение кинетической энергии молекул нагреваемого тела однозначно связано с увеличением температуры тела, а переход тепла есть передача молекулами продуктов горения части своей кинетической энергии молекулам нагреваемого вещества.

В молекулярно-кинетической теории суммарная кинетическая энергия хаотичного движения всех молекул тела плюс суммарная потенциальная энергия взаимодействия этих молекул друг с другом (но не с другими телами) называется внутренней энергией тела.

В термодинамике к понятию "внутренней энергии" приходят иным путем.

Если два тела разной температуры привести в контакт друг с другом, то с течением времени температура этих тел изменится. Одно тело при этом нагреется, а другое остынет. Нагревание одного тела и охлаждение другого тела будут происходить до тех пор, пока их температуры не сравняются. Как показывает опыт, температура каждого из тел в процессе нагревания или охлаждения в различных точках неодинакова и со временем меняется. Сначала изменится температура в месте соприкосновения тел. Затем изменение температуры произойдет в точках, прилежащих к месту контакта и, наконец, это изменение температуры захватит самые дальние точки тел. Такой процесс выравнивания температур сопровождается передачей некоторой доли кинетической энергии молекул одной части тела молекулам другой его части, т.е. передачей тепла, а сам процесс перехода тепла от одного конца тела к другому называется теплопроводностью. Важно заметить, что при теплопроводности само вещество не перемещается, а теплопередача всегда идет в определенном направлении: внутренняя энергия горячего тела уменьшается, а внутренняя энергия холодного тела увеличивается. Чем больше разность температур тел, тем интенсивней при прочих одинаковых условиях протекает процесс передачи тепла от горячего тела к холодному. Когда же температуры тел выравниваются, теплопередача прекращается и наступает тепловое равновесие.

Рассмотрим пример. Когда нагревается холодная вода в кастрюле,



поставленной на горячую плиту, происходит передача теплоты сквозь металлические стенки кастрюли. От чего зависит количество теплоты, передаваемой через какую-нибудь стенку? Прежде всего от разности температур по обе стороны стенки. Чем больше эта разность, тем большее количество теплоты передается через стенку за определенный промежуток времени. Это количество теплоты зависит также и от площади стенки. Вода в кастрюле с большим дном нагревается, как известно, скорее, чем в кастрюле с меньшим дном. Далее, легко убедиться на опыте, что количество теплоты, передаваемой за единицу времени через стенку при определенной разности температур, тем больше, чем тоньше стенка. Наконец, теплопередача сильно зависит от материала стенки.

Способностью проводить тепло или теплопроводностью обладают все вещества. Однако, теплопроводность различных веществ неодинакова. Лучшими проводниками тепла являются металлы. Хуже всех проводят тепло газы. Самым плохим проводником тепла является вакуум. Так называют пространство, в котором отсутствуют атомы или молекулы.

В жидкостях и в газах, кроме теплопроводности, теплопередача часто осуществляется конвекцией, т.е. механическим перемещением нагретых частей. Почти всегда при соприкосновении жидкости или газа с твердыми стенками, имеющими более высокую или более низкую температуру, в жидкости (или газе) возникают течения: нагревшаяся жидкость (или газ) поднимается вверх, а охладившаяся опускается вниз. Этот процесс происходит вследствие уменьшения плотности жидкости или газа при повышении их температуры.

Кроме теплопередачи посредством теплопроводности и конвекционных течений, огромное значение в природе и технике имеет теплопередача посредством испускания и поглощения излучения.

Отметим, что при теплопередаче далеко не всегда меняется тепловое состояние тел, т.е. их температура; например, когда лед тает, то передача теплоты меняет состояние тела (лед из твердого состояния переходит в жидкое), но температура его остается неизменной.

Температуру тела можно изменить не только нагревая его в пламени, но и совершая над ним работу. Это знали уже древние люди, добывая огонь трением.

Военный инженер Бенджамин Томпсон (граф Румфорд (1753-1814)) заинтересовался вопросом о получении тепла с помощью трения. Он писал: "... заведя сверлением пушечных стволов в мастерских военного арсенала в Мюнхене, я был сильно поражен тем значительным коли-

чеством тепла, которое за короткое время получает медный ствол при сверлении, и еще большим количеством тепла (гораздо большим, как я выяснил из эксперимента, чем тепло требуемое для закипания воды), которое получают металлические стружки, отделяемые от ствола сверлом". С помощью теории теплорода было трудно объяснить, откуда берется такое большое количество тепла. Запас тепла при сверлении казался неистощимым. Румфорд приходит к выводу, что теплота, выделявшаяся при сверлении, есть результат работы силы трения между сверлом и металлом. Кроме того он выдвигает гипотезу об одинаковой природе теплоты и энергии: "... мне кажется чрезвычайно трудно, если не совершенно невозможным, выдвинуть хоть какую-нибудь разумную идею, объясняющую то, что возбуждалось и передавалось в этих экспериментах, чем-либо отличным от движения".

Среди тех, кто одним из первых понял важность рассмотрения теплоты как энергии, был доктор Юлиус Роберт фон Майер (1814-1878). Он выдвинул предположение, ставшее почти банальным к началу двадцатого века: "... имеющаяся однажды налицо энергия не может превратиться в нуль, а только перейти в другую форму, и, следовательно, спрашивается: какую дальнейшую форму способна принять энергия?"

Развивая свои идеи о связи между энергией и теплом, Майер высказывает свое наиболее проницательное заключение. Если теплота есть форма кинетической и потенциальной энергий, а полная энергия сохраняется, то для получения определенного количества тепла необходимо затратить определенное количество механической энергии. Иными словами, заданная работа приводит к выделению заданного количества тепла. Из экспериментов, проведенных ранее для газов, Майеру удалось получить количественное соотношение между механической работой и теплотой, которое находится в хорошем согласии с результатами современных измерений.

Непосредственное измерение механического эквивалента теплоты осуществил Джеймс Прескотт Джоуль (1818-1889). В течение всей своей жизни Джоуль провел длинную серию экспериментов, в которых различные формы энергии превращались в тепло.

Из результатов опытов Джоуля следовало также, что при уменьшении механической энергии системы тел происходит соответствующее увеличение их внутренней энергии, а уменьшение внутренней энергии связано с увеличением механической энергии. Таким образом, опыты Джоуля дают подтверждение закона сохранения энергии в расширенном смысле. При всех движениях, как происходящих без трения, так и сопровождающихся трением, сумма кинетической, потенциальной и

внутренней энергий всех участвующих тел не изменяется.

#### Количество теплоты. Теплоемкость.

Внутренняя энергия тела зависит от его температуры и внешних условий — объема и т.д.. Если внешние условия остаются неизменными, т.е. объем и другие параметры постоянны, то внутренняя энергия тела зависит только от его температуры.

Изменить внутреннюю энергию тела можно не только нагревая его в пламени или совершая над ним механическую работу (без изменения положения тела, например, работа силы трения), но и приводя его в контакт с другим телом, имеющим температуру, отличную от температуры данного тела, т.е. посредством теплопередачи.

Количество внутренней энергии, которое тело приобретает или теряет в процессе теплопередачи и называется "количеством теплоты". Количество теплоты принято обозначать буквой  $Q$ . Если внутренняя энергия тела в процессе теплопередачи увеличивается, то телу приписывают знак плюс и говорят, что телу сообщили тепло  $Q$ . При уменьшении внутренней энергии в процессе теплопередачи тепло считается отрицательным и говорят, что от тела отняли количество теплоты  $Q$ .

Количество теплоты можно измерять в тех же единицах, в которых измеряется и механическая энергия. В системе СИ — это 1 Джоуль. Существует и другая единица теплоты — калория. Калория — это количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г воды на  $1^\circ\text{C}$ . Соотношение между этими единицами было установлено Джоулем:  $1 \text{ кал} = 4,18 \text{ Дж}$ . Это означает, что за счет работы в 4,18 кДж температура 1 килограмма воды повысится на 1 градус.

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела на  $1^\circ\text{C}$ , называется теплоемкостью тела. Теплоемкость тела обозначается буквой  $C$ . Если телу сообщили небольшое количество тепла  $\Delta Q$ , а температура тела изменилась на  $\Delta T$  градусов, то

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}. \quad (1)$$

Опыт показывает, что при обычных температурах ( $200 \div 500 \text{ K}$ ) теплоемкость большинства твердых и жидких тел почти не зависит от температуры. Для большинства расчетов будем принимать, что теплоемкость какого-нибудь вещества есть величина постоянная.

Кроме теплоемкости тела  $C$ , вводят еще удельную теплоемкость  $c$ , теплоемкость единицы массы вещества. Удельная теплоемкость  $c$  связана с теплоемкостью  $C$  тела массой  $m$  соотношением:  $C = c \cdot m$ .

Приведенные формулы позволяют рассчитать, какое количество теплоты  $Q$  надо передать телу массы  $m$ , чтобы повысить его температуру от  $T_1$  до  $T_2$  :

$$Q = C \cdot \Delta T = C \cdot (T_2 - T_1) = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1). \quad (2)$$

Если тело окружить оболочкой, плохо проводящей тепло, то температура тела, если оно предоставлено самому себе, будет оставаться в течение длительного времени практически постоянной. Таких идеальных оболочек в природе, конечно, не существует, но можно создать оболочки, которые по своим свойствам приближаются к таковым. Примерами могут служить обшивка космических кораблей, сосуды Дьюара, применяемые в физике и технике. Сосуд Дьюара представляет из себя стеклянный или металлический баллон с двойными стенками, между которыми создан высокий вакуум. Стеклянная колба домашнего термоса тоже является сосудом Дьюара.

Теплоизолирующей является оболочка калориметра – прибора, позволяющего измерять количество теплоты. Калориметр представляет собой большой тонкостенный стакан, поставленный на кусочки пробки внутрь другого большого стакана так, чтобы между стенками оставался слой воздуха, и закрытый сверху теплонепроводящей крышкой.

Если в калориметре привести в тепловой контакт два или несколько тел, имеющих различные температуры, и подождать, то через некоторое время внутри калориметра установится тепловое равновесие. В процессе перехода в тепловое равновесие одни тела будут отдавать тепло (суммарное количество тепла  $Q_{\text{отд}}$ ), другие будут получать тепло (суммарное количество тепла  $Q_{\text{пол}}$ ). А так как калориметр и содержащиеся в нем тела не обмениваются теплом с окружающим пространством, а только между собой, то можно записать соотношение, называемое также уравнением теплового баланса:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}. \quad (3)$$

В ряде тепловых процессов тепло может поглощаться или выделяться телом без изменения его температуры. Такие тепловые процессы имеют место при изменении агрегатного состояния вещества – плавлении, кристаллизации, испарении, конденсации и кипении. Коротко остановимся на основных характеристиках этих процессов.

Плавление – процесс превращения кристаллического твердого тела в жидкость. Процесс плавления происходит при постоянной температуре, тепло при этом поглощается.

Удельная теплота плавления  $\lambda$  равна количеству теплоты, необходимому для того, чтобы расплавить 1 кг кристаллического вещества, взятого при температуре плавления. Количество теплоты  $Q_{\text{пл}}$ , которое потребуется для перевода твердого тела массы  $m$  при температуре плавления в жидкое состояние равно

$$Q_{\text{пл}} = \lambda \cdot m. \quad (4)$$

Поскольку температура плавления остается постоянной, то количество теплоты, сообщаемое телу, идет на увеличение потенциальной энергии взаимодействия молекул, при этом происходит разрушение кристаллической решетки.

Процесс кристаллизации – это процесс, обратный процессу плавления. При кристаллизации жидкость превращается в твердое тело и выделяется количество теплоты, также определяемое формулой (4).

Испарение – это процесс превращения жидкости в пар. Испарение происходит с открытой поверхности жидкости. В процессе испарения жидкость покидают самые быстрые молекулы, т.е. молекулы, способные преодолеть силы притяжения со стороны молекул жидкости. Вследствие этого, если жидкость теплоизолирована, то в процессе испарения она охлаждается.

Удельная теплота испарения  $L$  равна количеству теплоты, необходимому для того, чтобы превратить в пар 1 кг жидкости. Количество теплоты  $Q_{\text{исп}}$ , которое потребуется для перевода в парообразное состояние жидкость массой  $m$  равно

$$Q_{\text{исп}} = L \cdot m. \quad (5)$$

Конденсация – процесс обратный процессу испарения. При конденсации пар переходит в жидкость. При этом выделяется тепло. Количество теплоты, выделяющейся при конденсации пара, определяется по формуле (5).

Кипение – процесс, при котором давление насыщенных паров жидкости равно атмосферному давлению, поэтому испарение происходит не только с поверхности, но и по всему объему ( в жидкости всегда имеются пузырьки воздуха, при кипении давление паров в них достигает атмосферного и пузырьки поднимаются вверх).

### Примеры решения задач

Задача 1. В сосуд, где находится  $V = 20$  л воды при температуре  $t_1 = 15^\circ\text{C}$ , опускают медный брусок некоторой массы и температурой  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ . После установления теплового равновесия температура воды в сосуде оказалась равной  $t = 60^\circ\text{C}$ . Определите массу медного бруска. Потерями тепла и теплоемкостью сосуда пренебречь.

Решение. В этом тепловом процессе в тепловой контакт приводятся вода и брусок, имеющие различные начальные температуры. Через некоторое время в сосуде установится тепловое равновесие. В процессе перехода в тепловое равновесие брусок, как более нагретое тело, будет отдавать тепло (обозначим суммарное количество отданной им теплоты  $Q_{\text{отд}}$ ), а вода, как тело менее нагретое, будет получать тепло (обозначим суммарное количество полученной ей теплоты  $Q_{\text{пол}}$ ). Так как по условию задачи сосуд не нагревается и потерь теплоты нет, то содержащиеся в нем тела не обмениваются теплом с окружающим пространством, а только между собой. Это позволяет записать уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}. \quad (1)$$

Определим количество отданного тепла  $Q_{\text{отд}}$ . Медная деталь массой  $M_M$  охлаждается от температура  $t_2 = 100^\circ\text{C}$  до температуры  $t = 60^\circ\text{C}$ , отдавая при этом количество теплоты

$$Q_{\text{отд}} = M_M c_M (t_2 - t),$$

где  $c_M = 380 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{град}}$  — удельная теплоемкость меди.

Для нагревания воды массой  $M_B$  от температуры  $t_1$  до температуры  $t$  ей требуется подвести количество теплоты

$$Q_{\text{пол}} = M_B c_B (t - t_1),$$

где  $c_B = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{град}}$  — удельная теплоемкость воды. Массу воды определим из соотношения  $M_B = \rho_B \cdot V$ . Здесь где  $\rho_B = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  — плотность воды.

Подставим полученные выше выражения для  $Q_{\text{отд}}$  и  $Q_{\text{пол}}$  в уравнение теплового баланса (1)

$$Q_{\text{отд}} = M_M c_M (t_2 - t) = Q_{\text{пол}} = M_B c_B (t - t_1),$$

откуда для массы  $M_M$  медной детали находим

$$M_M = \frac{M_B c_B (t - t_1)}{c_M (t_2 - t)} = \frac{\rho_B V c_B (t - t_1)}{c_M (t_2 - t)} =$$

$$= \frac{1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,02 \text{ м}^3 \cdot 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot (60^\circ - 15^\circ)}{380 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot (100^\circ - 60^\circ)} \approx 24,87 \text{ кг}.$$

Задача 2. В железном калориметре массой 100 г находится 600 г воды при температуре  $20^\circ\text{C}$ . В калориметр бросается свинец и алюминий общей массой 300 г и температурой  $90^\circ\text{C}$ . В результате температура в калориметре поднимается до  $22^\circ\text{C}$ . Определите количество свинца и алюминия. Удельная теплоемкость свинца  $c_{\text{св}} = 140 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ , алюминия  $c_{\text{ал}} = 920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ , железа  $c_{\text{ж}} = 460 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ . Потерями тепла пренебречь.

Решение. При достижении теплового равновесия в калориметре установится общая для всех тел температура  $t = 22^\circ\text{C}$ . Свинец и алюминий при охлаждении до этой температуры отдают тепло в количестве

$$Q_1 = m_{\text{ал}} c_{\text{ал}} (t_1 - t) + m_{\text{св}} c_{\text{св}} (t_1 - t).$$

Здесь  $m_{\text{ал}}$ ,  $m_{\text{св}}$ ,  $c_{\text{ал}}$ ,  $c_{\text{св}}$  — массы и удельные теплоемкости алюминия и свинца, соответственно,  $t_1 = 90^\circ\text{C}$  — их начальная температура, причем между массами свинца и алюминия выполняется соотношение

$$m_{\text{ал}} + m_{\text{св}} = m = 300 \text{ г}.$$

Железный калориметр и вода при нагревании до температуры  $t = 22^\circ\text{C}$  получают количество тепла

$$Q_2 = m_{\text{ж}} c_{\text{ж}} (t - t_2) + m_{\text{в}} c_{\text{в}} (t - t_2).$$

Здесь  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ ,  $m_{\text{ж}}$  и  $m_{\text{в}}$  — массы железного калориметра и воды,  $c_{\text{ж}}$  и  $c_{\text{в}}$  — удельные теплоемкости железа и воды, соответственно.

Запишем уравнение теплового баланса:

$$Q_1 = m_{\text{ал}} c_{\text{ал}} (t_1 - t) + m_{\text{св}} c_{\text{св}} (t_1 - t) = Q_2 = m_{\text{ж}} c_{\text{ж}} (t - t_2) + m_{\text{в}} c_{\text{в}} (t - t_2).$$

Из этого уравнения с учетом выражения для массы свинца и алюминия несложно получить:

$$m_{\text{св}} = \frac{m \cdot c_{\text{ал}} - \frac{(m_{\text{ж}} c_{\text{ж}} + m_{\text{в}} c_{\text{в}})(t - t_2)}{t_1 - t}}{c_{\text{ал}} - c_{\text{св}}} \approx 260 \text{ г},$$

$$m_{\text{ал}} = m - m_{\text{св}} = 40 \text{ г.}$$

**Задача 3.** В калориметре находится лед. Определить теплоемкость калориметра, если для нагревания его вместе с содержимым от  $-3^{\circ}\text{C}$  до  $-1^{\circ}\text{C}$  требуется количество теплоты  $Q_1 = 2,1 \text{ кДж}$ , а от  $-1^{\circ}\text{C}$  до  $+1^{\circ}\text{C}$  требуется количество теплоты  $Q_2 = 69,7 \text{ кДж}$ . Считать, что внешнее давление равно нормальному атмосферному давлению.

**Решение.** Количество теплоты, необходимое для нагревания калориметра со льдом от  $t_1 = -3^{\circ}\text{C}$  до  $t_2 = -1^{\circ}\text{C}$ , есть

$$Q_1 = c_{\text{л}}m_{\text{л}}(t_2 - t_1) + C_{\text{к}}(t_2 - t_1). \quad (1)$$

Здесь  $c_{\text{л}}$  и  $m_{\text{л}}$  — удельная теплоемкость и масса льда,  $C_{\text{к}}$  — теплоемкость калориметра.

При расчете количества теплоты, необходимого для нагревания калориметра со льдом от  $t_2 = -1^{\circ}\text{C}$  до  $t_3 = +1^{\circ}\text{C}$ , необходимо учесть тот факт, что температура  $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$  является температурой плавления льда при нормальном атмосферном давлении. Это означает, что агрегатное состояние содержимого калориметра изменится в процессе нагревания: лед расплавится и превратится в воду.

Для нагревания льда от температуры  $t_2$  до температуры плавления  $t_0$  требуется количество теплоты  $c_{\text{л}}m_{\text{л}}(t_0 - t_2)$ , для плавления льда требуется количество теплоты  $\lambda m_{\text{л}}$  и, наконец, для нагревания получившейся при таянии льда воды от температуры  $t_0$  до температуры  $t_3 = +1^{\circ}\text{C}$  требуется количество теплоты  $c_{\text{в}}m_{\text{л}}(t_3 - t_0)$ . Кроме этого, количество теплоты  $C_{\text{к}}(t_3 - t_2)$  необходимо для нагревания калориметра от  $t_2$  до  $t_3$ .

Таким образом, суммарное количество теплоты, необходимое для нагревания калориметра со льдом от  $t_2 = -1^{\circ}\text{C}$  до  $t_3 = +1^{\circ}\text{C}$ , равно

$$Q_2 = c_{\text{л}}m_{\text{л}}(t_0 - t_2) + \lambda m_{\text{л}} + c_{\text{в}}m_{\text{л}}(t_3 - t_0) + C_{\text{к}}(t_3 - t_2). \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) для теплоемкости калориметра  $C_{\text{к}}$  получаем

$$C_{\text{к}} = \frac{Q_2 - Q_1 \frac{c_{\text{л}}(t_0 - t_2) + \lambda + c_{\text{в}}(t_3 - t_0)}{c_{\text{л}}(t_2 - t_1)}}{t_3 - t_2 - \frac{c_{\text{л}}(t_0 - t_2) + \lambda + c_{\text{в}}(t_3 - t_0)}{c_{\text{л}}}} \approx 609 \frac{\text{Дж}}{\text{град}}.$$

**Задача 4.** В колбе находилась вода при  $t = 0^{\circ}\text{C}$ . Откачивая из колбы воздух и водяные пары, всю воду заморозили. Какая часть воды испарилась, если притока тепла извне не было?



Решение. Необходимое для образования пара тепло может быть получено только за счет теплоты кристаллизации, которая выделяется при замерзании воды.

При замерзании  $m_1$  граммов воды выделяется  $Q_1 = \lambda_B m_1$  джоулей тепла, где  $\lambda_B$  — удельная теплота кристаллизации воды. За счет этого тепла может образоваться водяной пар массой  $m_2$ . Для этого требуется количество теплоты  $Q_2 = L_B m_2$ , где  $L_B$  — удельная теплота парообразования воды. Уравнение теплового баланса для рассматриваемого теплового процесса можно записать следующим образом

$$Q_1 = \lambda_B m_1 = Q_2 = L_B m_2.$$

Масса всей воды до откачивания  $m = m_1 + m_2$ . Из этих двух уравнений находим, что

$$\frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{\lambda_B}{\lambda_B + L_B},$$

откуда для массы испарившейся воды получаем

$$m_2 = \frac{m \lambda_B}{\lambda_B + L_B} \approx 0,13m.$$

Задача 5. В медном сосуде массой 400 г находится вода массой 500 г при температуре  $40^\circ\text{C}$ . В сосуд помещают кусок льда при температуре  $-10^\circ\text{C}$ . Когда установилось тепловое равновесие, оказалось, что в сосуде остался нерасплавленный лед массой 75 г. Определите начальную массу льда. Удельная теплоемкость меди 400 Дж/(кг · град).

Решение. В рассматриваемой ситуации происходит теплообмен между сосудом и водой, с одной стороны, и льдом, с другой стороны. Сосуд и вода, как тела более нагретые, отдают тепло, а лед тепло получает.

Из условия задачи следует, что после установления теплового равновесия в сосуде находятся вода и лед. Это возможно лишь при условии, что температура в сосуде равна  $t = 0^\circ\text{C}$ .

На нагревание льда массой  $m_{л}$  от температуры  $t_1 = -10^\circ\text{C}$  до температуры  $t = 0^\circ\text{C}$  требуется количество теплоты  $Q_{\text{пол},1}$ :

$$Q_{\text{пол},1} = m_{л} c_{л} (t - t_1),$$

где  $c_{л}$  — удельная теплоемкость льда.

Для плавления льда массой  $m_{л,1}$  ( $m_{л,1} < m_{л}$ ) при температуре плавления необходимо количество теплоты  $Q_{\text{пол},2}$ :

$$Q_{\text{пол},2} = \lambda_{л} \cdot m_{л,1}$$

где  $\lambda_{\text{л}}$  — удельная теплота плавления льда.

Суммарное количество теплоты, получаемое льдом при его нагревании и плавлении некоторой его части ( $m_{\text{л},1}$ ), равно

$$Q_{\text{пол}} = Q_{\text{пол},1} + Q_{\text{пол},2} = \lambda_{\text{л}} \cdot m_{\text{л},1} + m_{\text{л}} c_{\text{л}}(t - t_1).$$

Масса нерасплавленного льда  $m_{\text{л},2} = 75$  г и масса расплавленного льда  $m_{\text{л},1}$  связаны с начальной массой льда  $m_{\text{л}}$  соотношением:

$$m_{\text{л}} = m_{\text{л},1} + m_{\text{л},2}. \quad (1)$$

Вода, первоначально находившаяся в сосуде ( $M_{\text{в}} = 500$  г) и медный сосуд массой  $M_{\text{с}} = 400$  г, охлаждаются от температура  $t_2 = 40^\circ\text{C}$  до температуры  $t = 0^\circ\text{C}$ , отдавая при этом количество теплоты  $Q_{\text{отд}}$ :

$$Q_{\text{отд}} = M_{\text{в}} c_{\text{в}}(t_2 - t) + M_{\text{с}} c_{\text{м}}(t_2 - t),$$

где  $c_{\text{в}}$  и  $c_{\text{м}}$  — удельные теплоемкости воды и меди, соответственно.

Уравнение теплового баланса для данного теплового процесса можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{отд}} = (M_{\text{в}} c_{\text{в}} + M_{\text{с}} c_{\text{м}})(t_2 - t) = Q_{\text{пол}} = \lambda_{\text{л}} \cdot m_{\text{л},1} + m_{\text{л}} c_{\text{л}}(t - t_1).$$

Отсюда, с учетом соотношения (1), для начальной массы льда получаем

$$m_{\text{л}} = \frac{(M_{\text{в}} c_{\text{в}} + M_{\text{с}} c_{\text{м}})(t_2 - t) + m_{\text{л},2} \lambda_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}} + c_{\text{л}}(t - t_1)} \approx 327 \text{ г}.$$

**Задача 6.** В калориметре смешивают воду массой  $m_1 = 300$  г при температуре  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  и лед массой  $m_2 = 400$  г при температуре  $t_2 = -20^\circ\text{C}$ . Определить установившуюся температуру смеси. Теплоемкостью калориметра и потерями тепла пренебречь.

**Решение.** Особая сложность рассматриваемой ситуации состоит в том, что нам ничего не известно про конечное агрегатное состояние системы. Будем решать задачу поэтапно.

Сначала подсчитаем количество теплоты  $Q_2$ , необходимое для нагревания льда от начальной температуры  $t_2$  до температуры плавления  $t_{\text{пл}} = 0^\circ\text{C}$ :

$$Q_2 = m_2 c_{\text{л}}(t_{\text{пл}} - t_2) = 16800 \text{ Дж}.$$

Далее найдем количество теплоты  $Q_1$ , которое может отдать вода, охлаждаясь от температуры  $t_1$  до  $0^\circ\text{C}$ :

$$Q_1 = m_1 c_{\text{в}}(t_1 - t_{\text{пл}}) = 12750 \text{ Дж}.$$

В этих выражениях  $c_v$  и  $c_l$  удельные теплоемкости воды и льда, соответственно.

Из сравнения  $Q_1$  и  $Q_2$  видно, что для того, чтобы нагреть весь лед до  $0^\circ C$ , недостает  $Q_2 - Q_1 = 4230$  Дж. Такое количество теплоты выделится при превращении в лед (кристаллизации) некоторой массы воды  $m_3$ , которую можно найти из соотношения:

$$Q_2 - Q_1 = \lambda m_3.$$

Имеем

$$m_3 = \frac{Q_2 - Q_1}{\lambda} \approx 12,8 \text{ г.}$$

Таким образом, в конечном состоянии в калориметре будет  $m_2 + m_3 = 412,8$  г льда и  $m_1 - m_3 = 287,2$  г воды при температуре  $0^\circ C$ .

#### Контрольные вопросы

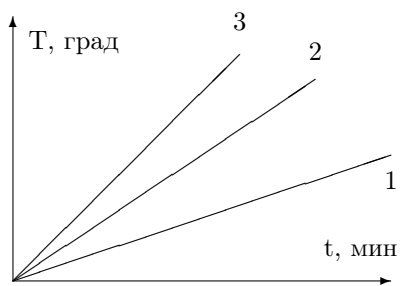


Рис.1

1. На рисунке приведены графики зависимости от времени температуры трех тел одинаковой массы: воды, меди и железа. Все три тела нагревались на одной и той же горелке. Объясните какой из графиков построен для воды, какой для меди и какой для железа.

2. Для нагревания медного бруска на  $10^\circ C$  потребовалось сообщить ему теплоты в количестве 35,6 Дж. Чему равен объем бруска?

3. Чему равна теплоемкость стальной детали объемом  $20 \text{ см}^3$ ?

4. Почему водяной пар при температуре  $100^\circ C$  обжигает сильнее воды той же температуры?

5. Два одинаковых брикета мороженого положили на стол в комнате. На один из них направили струю воздуха от вентилятора. Какой брикет растает быстрее?

6. Почему вода в кастрюле с крышкой закипает быстрее, чем без крышки?

7. Для того чтобы быстрее нагреть кастрюлю с водой, всегда помещают нагреватель внизу (например, ставят кастрюлю на плитку).

Желая охладить кастрюлю с горячей водой как можно быстрее до комнатной температуры, хозяйка поставила ее на лед. Правильно ли это?

### Задачи

1. Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы кусок льда массой  $m = 80$  г, взятый при температуре  $t_1 = -10^\circ\text{C}$ , превратить в пар при температуре  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ ?

2. В сосуде с теплоемкостью  $C = 500$  Дж/град, температура которого равна  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , смешиваются две химически не взаимодействующие жидкости, имеющие массы  $m_1 = 0,1$  кг и  $m_2 = 0,2$  кг, температуры  $t_1 = -5^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ , удельные теплоемкости  $c_1 = 4$  кДж/(кг · град) и  $c_2 = 2$  кДж/(кг · град). Какая температура установится в сосуде? Потерями теплоты пренебречь. Изменение агрегатных состояний веществ не происходит.

3. Кусок свинца, имеющий массу  $m_1 = 0,5$  кг, расплавился наполовину при сообщении ему количества теплоты  $Q = 30$  кДж. Какова была начальная температура свинца? Удельная теплоемкость свинца  $c_{\text{св}} = 140$  Дж/(кг · град), удельная теплота плавления свинца  $\lambda = 25$  кДж/кг, его температура плавления составляет  $327^\circ\text{C}$ .

4. 1 кг водяного пара при  $t = 100^\circ\text{C}$  впускают в холодную воду, взятую в количестве 12 кг. Температура воды после конденсации пара в ней поднялась до  $t = 70^\circ\text{C}$ . Какова была первоначальная температура воды? Потерями теплоты и теплоемкостью сосуда пренебречь.

5. В сосуд, содержащий воду массой  $m_1 = 100$  г при  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  поместили кусок льда при температуре  $t_2 = -50^\circ\text{C}$ , после чего температура образовавшейся ледяной массы оказалась равной  $t = -4^\circ\text{C}$ . Какое количество льда было положено в сосуд? Потерями теплоты и теплоемкостью сосуда пренебречь.

6. В калориметре находятся лед и вода при температуре  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ . Массы льда и воды одинаковы и равны 500 г. В калориметр вливают воду массой 1 кг при температуре  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ . Какая температура установится в калориметре? Потерями теплоты и теплоемкостью калориметра пренебречь.