

**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

(2006-2007 учебный год)



г. Долгопрудный, 2006

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

Физика: задание №2 для 8-х классов (2006-2007 учебный год). - М.: МФТИ, 2006, 20с.

Составитель:

**Кузьмичев Сергей Дмитриевич**

Изд. лиц. №040060 от 21.08.96г. Подписано 01.09.06

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

Уч.-изд. л. 1,11. Тираж 2000. Заказ № 4-з.

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

141700, Москов. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9  
ФЗФТШ при МФТИ, тел./факс (495) 408-5145 – **заочное отделение**  
тел./факс (495) 409-9351 – **очно-заочное отделение**  
тел.409-9583 – **очное отделение**

***E.mail: zftsh@pop3.mipt.ru***

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

© ФЗФТШ при МФТИ, 2006

## 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 отличаются друг от друга различным подходом к изучаемым явлениям. Однако, они не противоречат друг другу, а взаимно дополняют.

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 ее 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 XIX 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.

Прделайте 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 тепло. Этот опыт показывает, что наши ощущения, обычно надежные, могут оказаться ошибочными, и, поэтому, желательно 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 "докрасна" 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. Показания массивного термоскопа могут заметно отличаться от показаний маленького термоскопа.

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  $4^{\circ}\text{C}$ . От температуры зависят также сопротивление проводников и полупроводников, величина термо-электрического тока, давление газа в сосуде, спектр теплового излучения нагретых тел и т.д..

Первый прибор для наблюдений за изменением температуры (термоскоп) изобрел в конце XVI века итальянский ученый Галилео Галилей. Термоскоп Галилея представлял собой небольшой стеклянный шар с припаянной к нему узкой и длинной стеклянной трубкой. Трубка располагалась вертикально, так, что стеклянный шар оказывался вверху. При этом нижний конец трубки опускался в большой сосуд с водой. По мере нагревания или остывания колбы воздух в ней расширялся или сжимался и уровень воды в горлышке соответственно понижался или повышался. С помощью такого прибора можно было судить только об изменении степени нагретости тел: числовых значений температуры он не показывал, ибо не имел шкалы.

Кроме того, уровень воды в трубке зависел не только от температуры, но и от атмосферного давления.

В течение XVII столетия многие исследователи занимались усовершенствованием этого прибора. Его снабдили измерительной шкалой, откачали воздух, запаляли трубку и перевернули шариком вниз. Сама собой отпала необходимость в большом сосуде. Прибор все чаще стали называть не термоскопом, а термометром.

Показания разных термометров того времени не согласовывались друг с другом, не было договоренности о том, как разметать (градуировать) их шкалы. К концу XVII века все большую популярность приобретала идея построения температурной шкалы на основе использования двух постоянных температурных точек (реперных точек).

В начале XVIII века датский астроном О.Ремер изготовил термометр, где за постоянные точки своей температурной шкалы он принял температуры замерзания и кипения воды.

Идеи Ремера оценил Фаренгейт. Разметка шкалы в его термометре производилась следующим образом. На трубке отмечались два положения верхней границы столбика жидкости: когда шарик термометра находился в тающем льде (нижняя отметка) и когда шарик находился в кипящей воде (верхняя отметка). Интервал между отметками делился на 180 равных частей, причем первой точке было присвоено значение  $32^{\circ}F$ , а второй  $212^{\circ}F$  (градусов по шкале Фаренгейта).

Важнейшей заслугой Фаренгейта является также то, что он первым начал изготавливать ртутные термометры. В 1721 году комплект фаренгейтовских термометров заказал царь Петр I. Конструкция термометра, разработанная Фаренгейтом, применяется и теперь в комнатных и медицинских термометрах. Фаренгейт занимался не только усовершенствованиями конструкции термометра, но и проводил изучение некоторых тепловых явлений. Так, например, 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 (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 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 ( $^{\circ}C$ ). 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. Теплопередача**

Существует несколько 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.

Если два тела с разными температурами 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 местах 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. При равных объемах вода в кастрюле с большой площадью дна нагревается, как известно, быстрее, чем в кастрюле с дном малой площади. 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 изменяется тепловое состояние тел, т.е. их температура; например, когда лед тает, то передача теплоты изменяет состояние тела (лед из твердого состояния переходит в жидкое), но температура его остается неизменной.

### **Теплота и работа**

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: "...заведуя сверлением пушечных стволов в мастерских военного арсенала в Мюнхене, я был сильно поражен тем значительным количеством 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 теплу 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 1 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 теплоты  $\Delta Q$ , а температура тела изменилась на  $\Delta t$  градусов, то

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta t}. \quad (1.1)$$

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. Именно эта величина обычно приводится в справочниках физических величин. Удельная теплоемкость  $c$  связана с теплоемкостью  $C$  тела массой  $m$  соотношением:

$$C = c \cdot m. \quad (1.2)$$

Приведенные формулы позволяют рассчитать, какое количество теплоты  $Q$  надо передать телу массы  $m$ , чтобы повысить его температуру от  $t_1$  до  $t_2$ :

$$Q = C \cdot \Delta t = C \cdot (t_2 - t_1) = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1). \quad (1.3)$$

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

внутри другого большого стакана так, чтобы между стенками оставался слой воздуха, и закрытый сверху теплопроводящей 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 теплоты  $Q_{отд}$ ), другие будут получать тепло (суммарное количество теплоты  $Q_{пол}$ ). 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:

$$Q_{пол} = Q_{отд}. \quad (1.4)$$

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  $Q_{пл}$ , которое потребуется для перевода твердого тела массы  $m$  при температуре плавления в жидкое состояние, равно

$$Q_{пл} = \lambda \cdot m. \quad (1.5)$$

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 (1.5).

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  $Q_{исп}$ , которое потребуется для перевода в парообразное состояние жидкость массой  $m$  равно

$$Q_{исп} = L \cdot m. \quad (1.6)$$

**Конденсация** - процесс обратный процессу испарения. При конденсации пар переходит в жидкость. При этом выделяется тепло. Количество теплоты, выделяющейся при конденсации пара, определяется по формуле (1.6).

**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.** До какой температуры была нагрета при закалке стальная пилка массой  $200 \text{ г}$ , если при опускании ее в сосуд с маслом, через некоторое время в сосуде установилась общая температура  $35^\circ \text{C}$ ? Удельную теплоемкость стали считать равной  $500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ , а масла -  $1700 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ . Потерями теплоты и теплоемкостью сосуда пренебречь. Начальная температура масла в сосуде  $10^\circ \text{C}$ , ее масса равна  $2 \text{ кг}$ .

**Решение.** Во время рассматриваемого теплового процесса стальная пилка массой  $M_{ст}$  охлаждается от начальной температуры  $t_1$  до температуры  $t = 35^\circ \text{C}$ , отдавая при этом количество теплоты

$$Q_{ст} = c_{ст} \cdot M_{ст} \cdot (t_1 - t),$$

где  $c_{ст}$  - удельная теплоемкость стали.

За это же время масло массой  $M_m$  нагревается от начальной температуры  $t_2 = 10^\circ \text{C}$  до температуры  $t = 35^\circ \text{C}$ , получая при этом количество теплоты

$$Q_m = c_m \cdot M_m \cdot (t - t_2),$$

где  $c_m$  - удельная теплоемкость масла.

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

$$Q_{отд} = Q_{ст} = c_{ст} \cdot M_{ст} \cdot (t_1 - t) = Q_{пол} = Q_m = c_m \cdot M_m \cdot (t - t_2).$$

Здесь предполагается, что испарением масла можно пренебречь, т.е. теплота, выделяемая при охлаждении стальной пилки, идет только на нагревание масла.

Из последнего соотношения для начальной температуры стальной пилки получаем

$$t_1 = \left(1 + \frac{M_m c_m}{M_{cm} c_{cm}}\right) t - \frac{M_m c_m}{M_{cm} c_{cm}} t_2 = 885^{\circ} C.$$

**Задача 2.** Электрическая лампа мощностью  $P = 60 \text{ Вт}$  опущена в прозрачный калориметр, содержащий воду массой  $600 \text{ г}$ . За 5 минут вода нагрелась на  $\Delta t = 4^{\circ} C$ . Какую часть энергии, потребляемой лампой, калориметр пропускает наружу в виде излучения? Теплоемкостью калориметра пренебречь. Удельная теплоемкость воды  $4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{}^{\circ} C)$ .

**Решение.** Энергия  $W$ , потребляемая электрической лампой за время  $\tau = 300 \text{ с}$ , может быть рассчитана по формуле  $W = P \cdot \tau$ .

На нагревание воды массой  $m$  на  $\Delta t$  градусов затрачивается энергия (теплота)

$$Q = c_w \cdot m \cdot \Delta t,$$

где  $c_w$  - удельная теплоемкость воды.

Остальная часть потребляемой энергии в виде излучения выходит наружу. По отношению ко всей энергии энергия излучения составит долю:

$$\alpha = \frac{W - Q}{W} = \frac{P \cdot \tau - c_w \cdot m \cdot \Delta t}{P \cdot \tau}.$$

Вычисления для значения  $\alpha$  дают значение 0,44 или 44%.

**Задача 3.** В сосуд, содержащий воду массой  $m = 100 \text{ г}$  при температуре  $t_1 = 10^{\circ} C$  поместили кусок льда при температуре  $t_2 = -50^{\circ} C$ , после чего температура образовавшейся ледяной массы оказалась равной  $t = -4^{\circ} C$ . Какая масса льда была положена в сосуд? Потерями теплоты и теплоемкостью сосуда пренебречь.

**Решение.** Количество теплоты  $Q_1$ , необходимое для нагревания льда массой  $m_l$  от начальной температуры  $t_2 = -50^{\circ} C$  до температуры  $t = -4^{\circ} C$ , равно

$$Q_1 = c_l \cdot m_l \cdot (t - t_2).$$

При охлаждении воды массой  $m$  от температуры  $t_1 = 10^{\circ} C$  до температуры  $t_0 = 0^{\circ} C$ , она отдает количество теплоты  $Q_2$ :

$$Q_2 = c_w \cdot m \cdot (t_1 - t_0).$$

Количество теплоты  $Q_3$ , выделяемое при замерзании воды, равно

$$Q_3 = \lambda m.$$

Количество теплоты  $Q_4$ , выделяемое при остывании льда от  $t_0 = 0^{\circ} C$  до температуры  $t = -4^{\circ} C$ , есть

$$Q_4 = c_l \cdot m \cdot (t_0 - t).$$

Составим уравнение теплового баланса:

$$Q_{омд} = Q_2 + Q_3 + Q_4 = c_6 m(t_1 - t_0) + \lambda_6 m + c_а m(t_0 - t) = \\ = Q_{нол} = Q_1 = c_а m_а(t - t_2).$$

Из этого уравнения найдем массу льда:

$$m_а = \frac{c_6 m(t_1 - t_0) + \lambda_6 m + c_а m(t_0 - t)}{c_а(t - t_2)} \approx 0,394 \text{ кг}.$$

**Задача 4.** В калориметре находятся лед и вода при температуре  $t_1 = 0^\circ \text{C}$ . Массы льда и воды одинаковы и равны  $500 \text{ г}$ . В калориметр вливают воду массой  $1 \text{ кг}$  при температуре  $t_2 = 50^\circ \text{C}$ . Какая температура установится в нем? Теплоемкостью калориметра пренебречь.

**Решение.** Особенной температурой в данной ситуации является температура  $t_1 = 0^\circ \text{C}$  - температура таяния льда (или замерзания воды). Если количество теплоты, которое может отдать горячая вода при остывании до этой температуры, больше количества теплоты, необходимого для плавления всей массы льда, то в системе установится температура  $t > 0^\circ \text{C}$ . Допустим, что это так.

Для составления уравнения теплового баланса определим, какое количество теплоты могут отдать одни элементы системы, а какое количество теплоты могут получить другие. Теплоту отдает горячая вода при охлаждении от  $t_2 = 50^\circ \text{C}$  до искомой температуры  $t$ . Теплоту получают: лед (при плавлении) и холодная вода при нагревании от  $t_1 = 0^\circ \text{C}$  до температуры  $t$ .

Для плавления льда массой  $m_1 = 0,5 \text{ кг}$  при температуре плавления необходимо количество теплоты  $Q_1$ :

$$Q_1 = \lambda_6 m_1.$$

Количество теплоты  $Q_2$ , необходимое для нагревания холодной воды массой  $m_6 = 1 \text{ кг}$  от температуры  $t_1 = 0^\circ \text{C}$  до температуры  $t$ , равно

$$Q_2 = c_6 m_6(t - t_1).$$

Количество теплоты  $Q_3$ , отдаваемое водой массой  $m = 1 \text{ кг}$  при охлаждении ее от  $t_2 = 50^\circ \text{C}$  до температуры  $t$ , есть

$$Q_3 = c_6 m(t_2 - t).$$

Составим уравнение теплового баланса:

$$Q_{нол} = Q_1 + Q_2 = \lambda_6 m_1 + c_6 m_6(t - t_1) = Q_{омд} = Q_3 = c_6 m(t_2 - t).$$

Для температуры  $t$  из этого уравнения получаем:

$$t = \frac{c_6 m t_2 - \lambda_6 m_1 + c_6 m_6 t_1}{c_6 m_6 + c_6 m} \approx 5,4^\circ \text{C}.$$



Получившаяся температура больше  $0^{\circ}\text{C}$ , следовательно сделанное предположение оказалось верным и в сосуде установится температура  $5,4^{\circ}\text{C}$ .

**Задача 5.** В электрический чайник налили холодную воду при температуре  $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$ . Через время  $\tau = 10 \text{ мин}$  после включения чайника вода закипела. Через какое время она полностью испарится? Потерями теплоты пренебречь.

**Решение.** Для испарения воды массой  $m$  необходимо количество теплоты  $Q_1 = L_v \cdot m$ , где  $L_v$  - удельная теплота парообразования воды.

Пусть от нагревателя чайника в единицу времени поступает количество теплоты  $q$ , а  $\tau_1$  - время, необходимое для испарения всей воды, нагретой до температуры кипения. Тогда справедливо соотношение

$$Q_1 = L_v \cdot m = q \cdot \tau_1.$$

Количество теплоты  $Q_2$ , поступившее от нагревателя за время  $\tau$  и нагретое воду от начальной температуры  $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$  до температуры кипения  $t_2 = 100^{\circ}\text{C}$ , равно

$$Q_2 = q \cdot \tau = c_v \cdot m \cdot (t_2 - t_1),$$

где  $c_v$  - удельная теплоемкость воды. Отсюда для массы воды получаем:

$$m = \frac{q \cdot \tau}{c_v \cdot (t_2 - t_1)}.$$

Подставляя это выражение в соотношение для  $Q_1$ , имеем

$$q \cdot \tau_1 = \frac{L_v \cdot q \cdot \tau}{c_v \cdot (t_2 - t_1)}.$$

Отсюда для времени испарения воды получаем

$$\tau_1 = \frac{L_v \cdot \tau}{c_v \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} \cdot 600 \text{ с}}{4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)} \cdot 90 \text{ K}} \approx 1 \text{ час}.$$

**Задача 6.**  $1 \text{ кг}$  водяного пара при температуре  $t_n = 100^{\circ}\text{C}$  впускают в холодную воду, взятую в количестве  $12 \text{ кг}$ . Температура воды после конденсации в ней пара поднялась до  $t = 70^{\circ}\text{C}$ . Какова была первоначальная температура воды? Потерями теплоты пренебречь.

**Решение.** Попав в холодную воду, пар массой  $m_n$  конденсируется, выделяя количество теплоты  $Q_1 = L_v \cdot m_n$ . Здесь  $L_v$  - удельная теплота конденсации водяного пара. Получившаяся при конденсации пара вода охлаждается от температуры  $t_n = 100^{\circ}\text{C}$  до  $t = 70^{\circ}\text{C}$ , отдавая холодной воде количество теплоты

$$Q_2 = c_в \cdot m_n \cdot (t_n - t).$$

Для нагревания холодной воды массы  $m_в$  от начальной температуры  $t_в$  до температуры  $t = 70^\circ C$  требуется количество теплоты

$$Q_3 = c_в \cdot m_в \cdot (t - t_в).$$

Составим уравнение теплового баланса для рассматриваемого теплового процесса:

$$Q_{отд} = Q_1 + Q_2 = L_в m_n + c_в m_n (t_n - t) = Q_{пол} = Q_3 = c_в m_в (t - t_в).$$

Решая полученное уравнение, для начальной температуры воды находим:

$$t_в = t - \frac{L_в m_n}{c_в m_в} - \frac{m_n}{m_в} \cdot (t_n - t) = 22,5^\circ C.$$

**Задача 7.** В калориметре находится вода массой  $2,5 \text{ кг}$  при температуре  $5^\circ C$ . В калориметр с водой помещают кусок льда массой  $700 \text{ г}$ . Когда установилось тепловое равновесие, оказалось, что масса льда увеличилась на  $64 \text{ г}$ . Определите начальную температуру льда. Теплоемкостью калориметра пренебречь.

**Решение.** В рассматриваемой ситуации происходит теплообмен между водой, с одной стороны, и льдом, с другой стороны. Вода, как тело более нагретое, отдает тепло, а лед тепло получает. Начальная масса воды в сосуде оставляет  $2,5 \text{ кг}$ , а масса льда увеличилась на  $64 \text{ г}$ , т.е. не вся вода замерзла. Следовательно, после установления теплового равновесия в сосуде находятся вода и лед. Это возможно лишь при условии, что температура в сосуде равна  $t = 0^\circ C$ .

На нагревание льда массой  $m_л = 0,7 \text{ кг}$  от неизвестной начальной температуры  $t_1$  до температуры  $t = 0^\circ C$  требуется количество теплоты:

$$Q_{пол} = m_л \cdot c_л \cdot (t - t_1),$$

где  $c_л$  - удельная теплоемкость льда.

Вода массой  $M_в = 2,5 \text{ кг}$ , первоначально находившаяся в сосуде, охлаждается от температуры  $t_2 = 5^\circ C$  до температуры  $t = 0^\circ C$ , отдавая при этом количество теплоты

$$Q_{отд,1} = M_в \cdot c_в \cdot (t_2 - t),$$

где  $c_в$  - удельная теплоемкость воды.

В процессе замерзания воды массой  $m_в = 64 \text{ г}$  (именно на столько увеличилась масса льда) выделяется количество теплоты

$$Q_{отд,2} = \lambda_в \cdot m_в,$$

где  $\lambda_в$  - удельная теплота кристаллизации воды.

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

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{отд},1} + Q_{\text{отд},2} = M_{\text{е}} \cdot c_{\text{е}} \cdot (t_2 - t) + \lambda_{\text{е}} \cdot m_{\text{е}} = Q_{\text{пол}} = m_{\text{л}} \cdot c_{\text{л}} \cdot (t - t_1).$$

Отсюда для начальной температуры льда получаем

$$t_1 = t - \frac{M_{\text{е}} \cdot c_{\text{е}} \cdot (t_2 - t) + \lambda_{\text{е}} \cdot m_{\text{е}}}{m_{\text{л}} \cdot c_{\text{л}}} \approx -49,6^{\circ} \text{C}.$$

**Подробнее о температуре, методах и средствах её измерения читайте в журнале «ПОТЕНЦИАЛ» №10 за 2005 г. и №4 за 2006г.**

### Контрольные вопросы

1. Какое количество теплоты потребуется для нагревания на  $1^{\circ}\text{C}$  одного кубического сантиметра меди?
2. Теплоемкость кубика свинца в два раза больше теплоемкости кубика олова. Во сколько раз отличаются объемы этих кубиков?
3. Теплоемкость стального шарика объемом  $V = 100 \text{ см}^3$  равна  $300 \text{ Дж} / \text{K}$ . Имеет ли этот шарик полость?
4. Почему тонкая медная проволока плавится в пламени газовой горелки, в то время как толстый медный гвоздь даже не раскалится до красна?
5. Температура  $0^{\circ}\text{C}$  является, как известно, одновременно и температурой таяния льда, и температурой замерзания воды. Что же произойдет, если мы в сосуд с водой при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  положим кусок льда при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ ?
6. Будет ли кипеть вода в кастрюле, которая плавает в другой кастрюле с кипящей водой?
7. Кусок металла и кусок дерева имеют одинаковые температуры. Почему наощупь холодный металл кажется холоднее дерева, а горячий металл – горячее дерева? При какой температуре и металл и дерево будут казаться наощупь одинаковыми?

### Задачи

1. В электрический чайник налили  $0,8 \text{ л}$  холодной воды при температуре  $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$ . Через время  $\tau = 4 \text{ мин}$  после включения чайника вода закипела. Через какое время в том же чайнике закипит теплая вода объемом  $2 \text{ л}$ , взятая при температуре  $t_2 = 30^{\circ}\text{C}$ ? Потерями теплоты пренебречь.
2. В калориметр, содержащий  $m_1 = 2,35 \text{ кг}$  воды при температуре  $T_1 = 293 \text{ K}$ , опускают кусок олова, нагретого до температуры

$T_2 = 503 \text{ K}$ . После установления равновесия температура воды в калориметре повысилась на  $\Delta T = 15 \text{ K}$ . Определите массу олова. Удельная теплоемкость олова  $c_{\text{ол}} = 250 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ . Теплоемкостью калориметра и испарением воды пренебречь.

3. В латунном сосуде массой  $m_s = 0,2 \text{ кг}$  находится анилин массой  $m_1 = 0,4 \text{ кг}$  при температуре  $t_1 = 10^\circ \text{C}$ . В сосуд долили  $m_2 = 0,4 \text{ кг}$  анилина, имевшего температуру  $t_2 = 31^\circ \text{C}$ . После установления теплового равновесия температура в сосуде оказалась равной  $t = 20^\circ \text{C}$ . Найдите удельную теплоемкость анилина. Удельную теплоемкость латуни считать равной  $c_s = 380 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ . Потерями теплоты пренебречь.

4. В сосуд с нагревателем поместили один килограмм льда взятого при температуре  $-40^\circ \text{C}$ . При своей работе нагреватель каждую минуту сообщает содержимому сосуда  $8400 \text{ Дж}$ . Через некоторое время температура в сосуде достигла  $+60^\circ \text{C}$ . Начертите график зависимости температуры содержимого сосуда от времени. Потерями теплоты и теплоемкостью сосуда пренебречь.

5. Для расплавления  $m = 1000 \text{ кг}$  стали используется электропечь мощностью  $P = 100 \text{ кВт}$ . Сколько времени продолжается плавка, если слиток для начала плавления надо нагреть на  $\Delta T = 1500 \text{ K}$ ? Удельная теплоемкость стали  $c_{\text{ст}} = 500 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ , удельная теплота плавления стали  $\lambda_{\text{ст}} = 2,7 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$ .

6. К чайнику с кипящей водой каждую секунду подводится количество теплоты, равное  $1130 \text{ Дж}$ . При этом оказалось, что за секунду масса воды в чайнике уменьшается на  $0,4 \text{ г}$ . Какая доля подводимой теплоты теряется?

7. В медном калориметре массой  $400 \text{ г}$  находится вода массой  $500 \text{ г}$  при температуре  $40^\circ \text{C}$ . В калориметр помещают кусок льда при температуре  $-10^\circ \text{C}$ . Когда установилось тепловое равновесие, оказалось, что в калориметре остался нерасплавленный лед массой  $75 \text{ г}$ . Определите начальную массу льда. Удельная теплоемкость меди  $c_{\text{м}} = 400 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ .