

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**Московский физико-технический институт**  
**(государственный университет)**  
**Заочная физико-техническая школа**

**ФИЗИКА**

**Тепловые явления**

Задание №2 для 8-х классов

(2014 – 2015 учебный год)



г. Долгопрудный, 2014

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

Физика: задание №2 для 8-х классов (2014 – 2015 учебный год), 2014, 20 с.

**Дата отправления заданий по физике и математике – 29 ноября 2014 г.**

Составитель:

**Кузьмичёв Сергей Дмитриевич**

Подписано 03.10.14. Формат 60×90 1/16.

Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,25.

Уч.-изд. л. 1,11. Тираж 400. Заказ №20-з.

Заочная физико-техническая школа  
Московского физико-технического института  
(государственного университета)

ООО «Печатный салон ШАНС»

Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Москов. обл., 141700.

ЗФТШ, тел./факс (495) 408-5145 – **заочное отделение,**

тел./факс (498) 744-6351 – **очно-заочное отделение,**

тел. (499) 755-5580 – **очное отделение.**

*e-mail:* [zftsh@mail.mipt.ru](mailto:zftsh@mail.mipt.ru)

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

© ЗФТШ, 2014

## 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 тёплого и холодного, наделяя каждое тело определённым количеством некоей субстанции (вещества), которую они называли «огнём». 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 тёплого предмета к холодному. Представления древних греков о сущности тёплого 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 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 тёплого 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 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 тёплой 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 надёжные, 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: раскалённая «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, приведённые 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 объём. 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 термоэлектрического тока, давление газа в сосуде, спектр теплового излучения нагретых тел и т. д.

Первый прибор для наблюдений за изменением температуры (термоскоп) изобрёл в конце XVI века итальянский учёный Галилео Галилей. Термоскоп Галилея представлял собой небольшой стеклянный шарик с припаянной к нему узкой и длинной стеклянной трубкой. Трубка располагалась вертикально так, что стеклянный шарик 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 всё чаще стали называть не термоскопом, а термометром.

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

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

Идеи Рёмера оценил Фаренгейт. Разметка шкалы в его термометре производилась следующим образом. На трубочке 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, причём первой точке было присвоено значение  $32^{\circ}\text{F}$ , а второй  $212^{\circ}\text{F}$  (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 твёрдого 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 ( $^{\circ}\text{C}$ ). 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 273,15 К и 373,15 К соответственно,

$$T(\text{К}) = t^{\circ}\text{С} + 273,15.$$

### **Внутренняя энергия тела. Теплопередача**

Существует несколько способов изменить температуру тела. В одном из таких способов температуру тела изменяют, 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 её термины сохранились в современной науке о теплоте, особенно в тех её разделах, где рассматриваются потоки и перенос тепла. Мы по-прежнему говорим, что тепло течёт, 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 громаднейшего 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, помещённого в пламя горелки.

Кинетическая энергия молекул вещества меньше кинетической энергии «молекул пламени» (молекул веществ, входящих в состав пламени). При столкновении этих молекул часть энергии «молекул пламени» переходит молекулам вещества, и энергия этих молекул увеличивается, а энергия «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 изменяется. Сначала изменится температура в местах соприкосновения тел. Затем изменение температуры произойдёт 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 идёт в определённом 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 передаётся через стенку за определённый промежуток времени. Это количество теплоты зависит также и от площади стенки. При равных объёмах 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 определённой разности температур, тем больше, чем тоньше стенка. Наконец, скорость теплопередачи 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 твёрдыми стенками, имеющими более высокую или более низкую температуру, в жидкости (или газе) возникают течения: нагретая жидкость (или газ) поднимается вверх за счёт силы Архимеда, 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 лёд тает, то передача теплоты изменяет состояние тела (лёд из твёрдого состояния переходит в жидкое), но температура его остаётся 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: «... заведя сверлением пушечных стволов в мастерских военного арсенала в Мюнхене, я был сильно поражён тем значительным количеством тепла, которое за короткое время получает медный ствол при сверлении, и ещё 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 берётся 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 определённого количества тепла необходимо затратить определённое количество механической энергии. Иными словами, заданная работа приводит к выделению заданного количества тепла. Из экспериментов, проведённых 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 провёл 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. Теплоёмкость**

Внутренняя энергия тела зависит от его температуры и внешних условий – объёма и т. д. Если внешние условия остаются неизменными, т. е. объём 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 теплоте приписывают знак плюс, и говорят, что телу сообщили теплоту  $Q$ . При уменьшении внутренней энергии в процессе теплопередачи теплота считается отрицательной, и говорят, что от тела отняли (или отвели) 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 измерения теплоты – калория. *Калория* – это количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г воды на 1 °С. Соотношение между этими единицами было установлено Джоулем: 1 кал = 4,18 Дж. Это означает, что за счёт 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 теплоёмкостью тела. Теплоёмкость 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 ( $200 - 500 \text{ K}$ ) теплоёмкость большинства твёрдых и жидких тел почти не зависит от температуры. Для большинства расчётов будем принимать, что теплоёмкость какого-нибудь вещества есть величина постоянная.

Кроме теплоёмкости тела  $C$ , вводят ещё удельную теплоёмкость  $c$  – теплоёмкость единицы массы вещества. Именно эта величина обычно приводится в справочниках физических величин. Удельная теплоёмкость  $c$  связана с теплоёмкостью тела  $C$  и массой  $m$  тела соотношением:

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

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

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

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 собой стеклянный или металлический баллон с двойными зеркальными 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 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  $Q_{\text{отд}}$ ), другие будут получать тепло (суммарное количество теплоты  $Q_{\text{пол}}$ ). А так как калориметр и содержащиеся в нём тела не обмениваются теплом с окружающим пространством, а только между собой, то можно записать соотношение, называемое также *уравнением теплового баланса*:

$$Q_{\text{пол}} = Q_{\text{отд}}. \quad (1.4)$$

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 твёрдого 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 твёрдого тела массы  $m$  при температуре плавления в жидкое состояние, равно

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

Поскольку температура плавления остаётся постоянной, то количество теплоты, сообщаемое телу, идёт на увеличение потенциальной энергии взаимодействия молекул, при этом происходит разрушение кристаллической решётки.

Процесс *кристаллизации* – это процесс, обратный процессу плавления. При кристаллизации жидкость превращается в твёрдое 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 парообразования  $L$  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

$$Q_{\text{исп}} = L \cdot m. \quad (1.6)$$

*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 объёму (в жидкости всегда имеются пузырьки воздуха, при кипении давление паров в них достигает атмосферного, и пузырьки поднимаются вверх).

### Примеры решения задач

**Задача 1.** Электрическая лампа мощностью  $P = 60$  Вт опущена в прозрачный калориметр, содержащий воду массой 600 г. За 5 минут вода нагрелась на  $\Delta t = 4^\circ\text{C}$ . Какую часть энергии, потребляемой лампой, калориметр пропускает наружу в виде излучения? Теплоёмкостью калориметра пренебречь.

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

Часть потребляемой лампой энергии поглощается водой и приводит к её нагреванию, а оставшаяся часть через прозрачные стенки калориметра выходит наружу.

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

$$Q = c_{\text{в}} \cdot m \cdot \Delta t,$$

где  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоёмкость воды.

Остальная часть потребляемой энергии ( $W_{\text{наружу}} = W - Q$ ) в виде излучения выходит наружу. Тогда искомая величина определится из выражения:

$$\alpha = \frac{W_{\text{наружу}}}{W} = \frac{W - Q}{W} = \frac{P \cdot \tau - c_{\text{в}} \cdot m \cdot \Delta t}{P \cdot \tau}.$$

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

**Задача 2.** Двигатель скутера развивает полезную мощность  $P = 3$  кВт при скорости  $v = 36$  км/ч. Сколько километров проедет скутер, израсходовав  $V = 3$  л бензина, если КПД двигателя  $\eta = 20\%$ ?

**Решение.** Определим, какое количество теплоты  $Q$  выделяется при сгорании бензина объёмом  $V$ . Для расчёта этой величины нужно знать удельную теплоту сгорания  $q$  данного вида топлива (для бензина  $q = 46$  МДж/кг) и массу  $m$  сгоревшего топлива. С учётом того, что  $m = \rho V$ , где  $\rho = 700$  кг/м<sup>3</sup> – плотность бензина, получаем

$$Q = qm = q\rho V.$$

Только часть этого количества теплоты расходуется «с пользой» (идёт на создание полезной мощности  $P$ ). Если двигатель, развивая постоянную мощность  $P$  проработал в течение времени  $\tau$ , то совершённая им работа  $A$  равна  $P\tau$ . Эффективность преобразования теплоты (энергии)  $Q$  сгорания топлива в механическую работу  $A$  двигателя характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД) двигателя  $\eta$

$$\eta = \frac{A}{Q} \cdot 100\% = \frac{P\tau}{Q} \cdot 100\%.$$

Отсюда для времени работы двигателя находим

$$\tau = \frac{\eta}{100\%} \cdot \frac{Q}{P}.$$

Теперь для расстояния  $L$ , которое проедет скутер на указанном объёме бензина, получаем

$$\begin{aligned} L = v\tau &= \frac{\eta}{100\%} \cdot \frac{Q}{P} \cdot v = \frac{\eta}{100\%} \cdot \frac{q\rho V}{P} \cdot v = \\ &= \frac{20\%}{100\%} \cdot \frac{46 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} \cdot 700 \text{ кг/м}^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{3 \cdot 10^3 \text{ Дж/с}} \cdot 10 \text{ м/с} = 64,4 \text{ км}. \end{aligned}$$

**Задача 3.** С какой скоростью должна лететь свинцовая пуля, чтобы при неупругом ударе о деревянную стенку она наполовину расплавилась? Удельная теплоёмкость свинца  $c_{\text{св}} = 130$  Дж/(кг·К), удельная теплота плавления свинца  $\lambda_{\text{св}} = 25 \cdot 10^3$  Дж/кг, температура плавления свинца  $t_{\text{пл}} = 327^\circ\text{C}$ . Температура пули перед ударом  $t_1 = 152^\circ\text{C}$ . Считать, что 60% теплоты, выделившейся при ударе пули о стену, передаётся пуле.

**Решение.** Пусть  $v$  – скорость пули массой  $m$  перед ударом о стену. После удара о стену пуля останавливается. Следовательно, её кинетическая энергия уменьшается от начального значения  $mv^2/2$  до нуля.

При неупругом ударе полное количество выделившейся теплоты равно убыли механической энергии:  $Q_{\text{полн}} = \Delta E_{\text{мех}} = mv^2 / 2$ . В рассматриваемом случае на нагревание и плавление пули идёт только часть всей выделившейся теплоты:  $Q_{\text{пули}} = 0,6Q_{\text{полн}}$ .

Часть полученной пулей теплоты идёт на её нагревание от начальной температуры  $t_1$  до температуры плавления  $t_{\text{пл}}$

$$Q_{\text{пули,1}} = c_{\text{св}}m(t_{\text{пл}} - t_1),$$

а оставшаяся часть – на плавление половины пули

$$Q_{\text{пули,2}} = 0,5\lambda_{\text{св}}m.$$

С учётом полученных ранее соотношений имеем

$$Q_{\text{пули}} = 0,6 \cdot \frac{mv^2}{2} = Q_{\text{пули,1}} + Q_{\text{пули,2}} = c_{\text{св}}m(t_{\text{пл}} - t_1) + 0,5\lambda_{\text{св}}m,$$

откуда после преобразований для скорости пули получаем

$$v = \sqrt{\frac{2c_{\text{св}}(t_{\text{пл}} - t_1) + \lambda_{\text{св}}}{0,6}} =$$

$$\approx \sqrt{\frac{2 \cdot 130 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 175 \text{ К} + 25 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}}{0,6}} \approx 343 \text{ м/с}.$$

**Задача 4.** В калориметр, содержащий  $M_{\text{в}} = 2,35$  кг воды при температуре  $T_1 = 293$  К, опускают кусок олова, нагретого до температуры  $T_2 = 503$  К. После установления равновесия температура воды в калориметре повысилась на  $\Delta T = 15$  К. Определите массу олова. Удельная теплоёмкость олова  $c_{\text{ол}} = 250$  Дж/(кг · К). Теплоёмкостью калориметра и испарением воды пренебречь.

**Решение.** В этом тепловом процессе в тепловой контакт приводятся три тела (калориметр, вода и олово), имеющие различные температуры. Через некоторое время внутри калориметра установится тепловое равновесие.

В процессе перехода в тепловое равновесие одни тела (в данном случае – олово) будут отдавать теплоту (суммарное количество теплоты  $Q_{\text{отд}}$ ), другие (калориметр и вода) будут получать теплоту (суммарное количество теплоты  $Q_{\text{пол}}$ ). А так как калориметр и содержащиеся в нем тела не обмениваются теплом с окружающим пространством (только между собой), то можно воспользоваться уравнением теплового баланса:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{пол}}.$$



Во время рассматриваемого теплового процесса олово массой  $M_{\text{ол}}$  охлаждается от температуры  $T_2 = 503 \text{ К}$  до температуры  $T_3 = T_1 + \Delta T = 308 \text{ К}$ , отдавая при этом количество теплоты  $Q_{\text{ол}}$ :

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{ол}} = c_{\text{ол}} M_{\text{ол}} (T_2 - T_3),$$

где  $c_{\text{ол}}$  – удельная теплоёмкость олова.

За это же время вода массой  $M_{\text{в}} = 2,35 \text{ кг}$  нагревается от температуры  $T_1 = 293 \text{ К}$  до температуры  $T_3$ , получив при этом количество теплоты  $Q_{\text{в}}$ :

$$Q_{\text{пол}} = Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} M_{\text{в}} (T_3 - T_1),$$

где  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоёмкость воды.

Так как по условию задачи теплоёмкостью калориметра можно пренебречь, то количество теплоты полученной калориметром можно считать равной нулю.

Таким образом, уравнение теплового баланса для данного теплового процесса можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{ол}} = c_{\text{ол}} M_{\text{ол}} (T_2 - T_3) = Q_{\text{пол}} = Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} M_{\text{в}} (T_3 - T_1).$$

Здесь учтено, что по условию задачи испарением воды можно пренебречь, т. е. теплота, выделяемая при охлаждении олова, идёт только на нагревание воды.

Из последнего соотношения для массы олова получаем

$$M_{\text{ол}} = \frac{c_{\text{в}} M_{\text{в}} (T_3 - T_1)}{c_{\text{ол}} (T_2 - T_3)} = \frac{4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 2,35 \text{ кг} \cdot (308 \text{ К} - 293 \text{ К})}{250 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot (503 \text{ К} - 308 \text{ К})} \approx 3,04 \text{ кг}.$$

**Задача 5.** В калориметр, где находится вода массой  $M_{\text{в}} = 2,5 \text{ кг}$  при температуре  $t_{\text{в}} = 5^\circ \text{C}$ , помещают кусок льда массой  $M_{\text{л}} = 700 \text{ г}$ . Когда установилось тепловое равновесие, оказалось, что масса льда увеличилась на  $m = 64 \text{ г}$ . Определите начальную температуру льда. Теплоёмкостью калориметра и потерями теплоты пренебречь. Удельная теплота плавления льда  $\lambda_{\text{л}} = 3,34 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ , удельная теплоёмкость воды и льда  $c_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .  $c_{\text{л}} = 2100 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ .

**Решение.** В рассматриваемой ситуации происходит теплообмен между водой, с одной стороны, и льдом, с другой стороны. Вода, как тело более нагретое, отдаёт теплоту, а лёд теплоту получает.

Начальная масса воды в сосуде оставляет  $M_{\text{в}} = 2,5$  кг, а масса льда увеличилась на  $m = 64$  г, т. е. не вся вода замёрзла. Следовательно, после установления теплового равновесия в сосуде находятся вода и лёд. Это возможно лишь при условии, что температура в сосуде равна  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ .

На нагревание льда массой  $M_{\text{л}} = 700$  г от неизвестной начальной температуры  $t_{\text{л}}$  до температуры  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  требуется количество теплоты  $Q_{\text{пол}}$ :

$$Q_{\text{пол}} = c_{\text{л}} M_{\text{л}} (t_0 - t_{\text{л}}),$$

где  $c_{\text{л}}$  – удельная теплоёмкость льда.

Вода, первоначально находившаяся в сосуде, охлаждается от температуры  $t_{\text{в}} = 5^\circ\text{C}$  до температуры  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , отдавая при этом количество теплоты  $Q_{\text{отд},1}$ :

$$Q_{\text{отд},1} = c_{\text{в}} M_{\text{в}} (t_{\text{в}} - t_0),$$

где  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоёмкость воды.

В процессе замерзания воды массой  $m = 64$  г выделяется количество теплоты  $Q_{\text{отд},2}$ :

$$Q_{\text{отд},2} = \lambda_{\text{л}} m,$$

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

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

$$Q_{\text{отд}} = Q_{\text{отд},1} + Q_{\text{отд},2} = M_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_{\text{в}} - t_0) + \lambda_{\text{л}} m = Q_{\text{пол}} = M_{\text{л}} c_{\text{л}} (t_0 - t_{\text{л}}).$$

Решая это уравнение относительно начальной температуры льда  $t_{\text{л}}$ , получаем

$$t_{\text{л}} = t_0 - \frac{M_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_{\text{в}} - t_0) + \lambda_{\text{л}} m}{M_{\text{л}} c_{\text{л}}} \approx -50,3^\circ\text{C}.$$

**Задача 6.** В калориметр, содержащий лёд массой  $m = 100$  г при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$ , впускают некоторую массу пара при температуре  $t_{\text{п}} = 100^\circ\text{C}$ . После установления равновесия весь лёд растаял, и в калориметре оказалась только вода при температуре  $t = 0^\circ\text{C}$ . Определите массу воды в калориметре в этот момент. Теплоёмкостью калориметра и потерями теплоты пренебречь.

**Решение.** Из условия задачи следует, что весь пар сконденсировался, а появившаяся при этом вода остыла от температуры  $t_{\text{п}} = 100^{\circ}\text{C}$  до  $t = 0^{\circ}\text{C}$ . Для количества теплоты, отданного паром при конденсации и горячей водой при охлаждении имеем:

$$Q_{\text{отд}} = m_{\text{п}}L_{\text{в}} + c_{\text{в}}m_{\text{п}}(t_{\text{п}} - t),$$

где  $m_{\text{п}}$  – масса пара (искомая величина),  $L_{\text{в}}$  – удельная теплота парообразования воды,  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоёмкость воды.

Так как весь лёд растаял, то количество теплоты, полученное льдом при плавлении равно:  $Q_{\text{пол}} = m\lambda_{\text{л}}$ .

Тогда из уравнения теплового баланса

$$Q_{\text{отд}} = m_{\text{п}}L_{\text{в}} + c_{\text{в}}m_{\text{п}}(t_{\text{п}} - t) = Q_{\text{пол}} = m\lambda_{\text{л}}$$

для массы пара получаем  $m_{\text{п}} = \frac{m\lambda_{\text{л}}}{L_{\text{в}} + c_{\text{в}}(t_{\text{п}} - t)} = 12,5 \text{ г.}$

Окончательно, для полной массы воды в калориметре имеем:

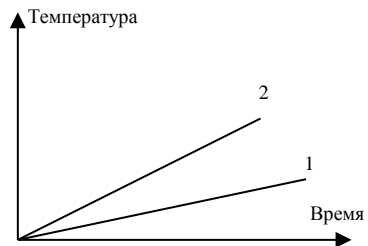
$$m_{\text{в}} = m + m_{\text{п}} = 112,5 \text{ г.}$$

### Контрольные вопросы

1. Дайте краткую характеристику процессу плавления кристаллического тела. На что расходуется теплота, сообщаемая телу при плавлении?
2. Можно ли обычным ртутным термометром измерить температуру одной капли горячей воды объёмом  $V = 0,01 \text{ см}^3$ ? Ответ обоснуйте.
3. Почему вода в кастрюле с крышкой закипает быстрее, чем без крышки?
4. Самопроизвольно теплота способна переходить только от тела с более высокой температурой к менее нагретому телу. Температура нашего тела выше температуры окружающего воздуха в нагретой комнате. Почему же нам в такой комнате тепло?
5. Почему, попав на кожу, водяной пар при температуре  $100^{\circ}\text{C}$  обжигает сильнее воды той же температуры? Ответ обоснуйте.

6. Теплоёмкость стального шарика объёмом  $V = 100 \text{ см}^3$  равна  $300 \text{ Дж/К}$ . Имеет ли этот шарик полость?

7. На рисунке приведены графики зависимости от времени температур содержимого двух одинаковых сосудов. В одном сосуде находится только вода массой  $1 \text{ кг}$ , в другом – вода и



стальная деталь, общая масса которых также 1 кг. Оба сосуда нагревались на одинаковых горелках. Какой из графиков соответствует температуре в сосуде, где находится только вода. Ответ поясните.

### Задачи

1. На самолёте установлено два одинаковых двигателя, каждый из которых развивает силу тяги  $F = 8$  кН. Определите массу авиационного топлива, необходимую самолёту для преодоления расстояния  $S = 3000$  км. Удельная теплота сгорания топлива  $q = 40$  МДж/кг, КПД двигателя принять равным  $\eta = 20\%$ .

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

3. С какой минимальной скоростью метеорит влетает в атмосферу Земли, если при этом он нагревается и плавится? Метеоритное вещество состоит из железа. Начальная температура метеорита  $t_0 = 3^\circ\text{C}$ . Считать, что в тепло превращается 80% кинетической энергии метеорита. Температура плавления железа  $t_{\text{пл}} = 1538^\circ\text{C}$ .

4. Для измерения температуры воды, имеющей массу  $m = 66$  г, в неё погрузили термометр, который показал температуру  $32,4^\circ\text{C}$ . Какова действительная температура воды, если теплоёмкость  $C_T$  термометра равна  $1,9$  Дж/К и перед погружением в воду он показывал температуру в помещении равную  $17,8^\circ\text{C}$ ? Потерями теплоты пренебречь.

5. В сосуд, содержащий воду массой  $m = 100$  г при температуре  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  поместили кусок льда при температуре  $t_2 = -50^\circ\text{C}$ . После установления теплового равновесия в сосуде оказался только лёд при температуре  $t = -4^\circ\text{C}$ . Какая масса льда была положена в сосуд? Потерями теплоты и теплоёмкостью сосуда пренебречь.

6. В медном калориметре массой  $M_m = 400$  г находится вода массой  $M_v = 500$  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 лёд массой  $75$  г. Определите начальную массу льда.

7. В колбе находилась вода при  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Откачивая из колбы воздух и водяные пары, всю воду заморозили посредством собственного испарения. Какая часть воды испарилась, если притока теплоты извне не было?