

**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

(2007-2008 учебный год)



г. Долгопрудный, 2007

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

Физика: задание №2 для 8-х классов (2007-2008 учебный год). - М.: МФТИ, 2007, 20с.

Составитель:

Кузьмичев Сергей Дмитриевич

Изд. лиц. №040060 от 21.08.96г. Подписано 12.09.07

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

Уч.-изд. л. 1,22. 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

© **ФЗФТШ при МФТИ, 2007**

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 беспорядочное непрерывное 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 всегда более холодными, чем деревянные или пластмассовые. Рукой можно грубо отличить холодную воду от горячей, однако мы знаем, что при этом нетрудно и ошибиться.

Проделайте 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 A и B нет необходимости обязательно приводить их в тепловой контакт друг с другом. Можно для этой цели воспользоваться третьим телом C , приводимым последовательно в контакт с телами A и B . В основе этого способа сравнения температур лежит следующий опытный факт.

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

Достаточно малое тело C , 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°C до 4°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) изобрёл в конце XVI века итальянский учёный 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 сверху. 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, запаяли 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 от том, как размечать (градуировать) их шкалы. К концу XVII века всё 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 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 $32^{\circ}F$, 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 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 (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 разделён 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, причём 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. 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 ки-

нетической 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 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 передается через стенку за определенный 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, 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 твёрдыми 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 лёд тает, то передача теплоты изменяет состояние тела (лёд из твёрдого 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: "...заведую 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 берётся такое большое количество тепла. Запас тепла при сверлении казался неистощимым. Румфорд приходит к выводу, что теплота, выделяющаяся 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 своё наиболее пронизательное 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 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. 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.

Допустим, что внешние силы не совершают механической работы над телом. Тогда изменить внутреннюю энергию тела можно 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 количество теплоты Q . При уменьшении внутренней энергии в процессе теплопередачи теплота считается отрицательной 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°C . Соотношение между этими единицами было установлено Джоулем: $1 \text{ кал} = 4,18 \text{ Дж}$. Это означает, что за счёт работы в 1 кДж температура 1 килограмма воды повысится на 1 градус.

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела на 1°C , называется теплоёмкостью тела. Теплоёмкость тела обозначается буквой C . Если телу сообщили небольшое количество теплоты ΔQ , а температура тела изменилась на Δt градусов, то

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

Опыт показывает, что при обычных температурах ($200 \div 500 \text{ K}$) 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 C тела массой m 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 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 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 λ равна количеству теплоты, необходимому для того, чтобы расплавить 1 кг кристаллического вещества, взятого при температуре плавления. Количество тепло-

ты $Q_{\text{пл}}$, 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 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

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

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. Для определения удельной теплоёмкости меди в алюминиевый калориметр массой 60 г, содержащий 400 г воды, была опущена медная гиря массой 500 г. Начальная температура гири 100°C . Начальная температура калориметра с водой 15°C . Какое значение удельной теплоёмкости было найдено, если конечная температура в калориметре $23,4^\circ\text{C}$? Удельная теплоёмкость алюминия $c_{\text{ал}} = 920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$, удельная теплоёмкость воды $c_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

Решение. В этом тепловом процессе в тепловой контакт приводятся три тела, имеющие различные температуры (алюминие-

вый калориметр, вода и медная гири). Через некоторое время внутри калориметра установится тепловое равновесие.

В процессе перехода в тепловое равновесие одни тела (в данном случае – гири) 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 нём тела не обмениваются теплом с окружающим пространством, а только между собой, то можно записать уравнение теплового баланса: $Q_{\text{пол}} = Q_{\text{отд}}$.

Определим количество отданной теплоты $Q_{\text{отд}}$. Медная деталь массой $M_{\text{м}}$ охлаждается от температуры $t_1 = 100^\circ\text{C}$ до температуры $t = 23,4^\circ\text{C}$, отдавая при этом количество теплоты $Q_{\text{отд}} = Q_{\text{м}} = c_{\text{м}} \cdot M_{\text{м}} (t_2 - t_1)$, где $c_{\text{м}}$ – удельная теплоёмкость меди (искомая величина).

Определим количество полученной теплоты $Q_{\text{пол}}$. Оно складывается из теплоты полученной калориметром $Q_{\text{к}}$ и теплоты полученной водой $Q_{\text{в}}$: $Q_{\text{пол}} = Q_{\text{к}} + Q_{\text{в}}$.

Так как калориметр и вода нагреваются от начальной температуры t_2 до конечной t , то входящие в это выражение величины $Q_{\text{к}}$ и $Q_{\text{в}}$ определяются следующим образом:

$$Q_{\text{к}} = c_{\text{ал}} \cdot M_{\text{ал}} (t - t_2), \quad Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} \cdot M_{\text{в}} (t - t_2).$$

Здесь $M_{\text{ал}}$ и $M_{\text{в}}$ – массы алюминиевого калориметра и воды соответственно, $c_{\text{ал}}$ и $c_{\text{в}}$ – удельные теплоёмкости алюминия и воды.

Подставляя полученные выражения в уравнение теплового баланса, для удельной теплоёмкости меди получаем:

$$c_{\text{м}} = \frac{M_{\text{ал}} c_{\text{ал}} (t - t_2) + M_{\text{в}} c_{\text{в}} (t - t_2)}{M_{\text{м}} (t_1 - t)} \approx 380 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Задача 2. К чайнику с кипящей водой каждую секунду подводится энергия, равная 1,13 кДж. Найдите скорость истечения пара из

носика чайника, площадь сечения S которого равна 1 см^2 . Плотность $\rho_{\text{п}}$ водяного пара считать равной 1 кг/м^3 .

Решение. Пусть $q = 1,13 \text{ кДж/с}$ – энергия, подводимая еже-секундно к чайнику с кипящей водой. Будем считать, что вся эта энергия идёт на превращение воды в пар (т.е. пренебрежём потерями энергии на нагревание самого чайника и окружающего воздуха). Тогда за τ секунд к воде подводится энергия $Q_{\text{подв}} = q\tau$ и уже нетрудно рассчитать массу воды $m_{\text{в}}$ превращающуюся в пар

за это время: $m_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{подв}}}{L_{\text{в}}} = \frac{q\tau}{L_{\text{в}}}$, где $L_{\text{в}}$ – удельная теплота паро-

образования воды.

Масса пара, проходящая за время τ через носик чайника равна массе испарившейся воды ($m_{\text{п}} = m_{\text{в}}$). За это время через выходное отверстие носика чайника смогут пролететь только те порции пара, которые находились от него на расстоянии не дальше, чем $l = v \cdot \tau$, где v – скорость течения пара.

Тогда объём V пара, выходящего из носика чайника за время τ равен $V = Sl = S v \tau$, а его масса равна $m_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} V = \rho_{\text{п}} S v \tau$.

Из двух уравнений для скорости v истечения пара находим:

$$v = \frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} S \tau} = \frac{q\tau}{L_{\text{в}} \rho_{\text{п}} S \tau} = \frac{q}{L_{\text{в}} \rho_{\text{п}} S} = 5 \text{ м/с}.$$

Задача 3. Сосуд с водой имеет начальную температуру $t_{\text{в}} = 22^\circ \text{C}$. Его общая теплоёмкость равна $C = 1670 \text{ Дж/К}$. В сосуд поместили $m_{\text{л}} = 100 \text{ г}$ льда при температуре $t_{\text{л}} = -8^\circ \text{C}$. Какая температура установится в сосуде?

Решение. Особенной температурой в данной ситуации является температура $t_0 = 0^\circ \text{C}$ – температурой таяния льда (или замерзания воды). Если количество теплоты, которое могут отдать тёплая вода и сосуд 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 отдают тёплая вода и сосуд при охлаждении от $t_{\text{в}} = 20^\circ \text{C}$ до искомой температуры t . Теплоту получают: лёд (при нагревании до $t_0 = 0^\circ \text{C}$), лёд (при плавлении) и получившаяся из льда холодная вода при нагревании от $t_0 = 0^\circ \text{C}$ до температуры t .

Количество теплоты Q_1 , необходимое для нагревания льда массой от температуры $t_{\text{л}} = -8^\circ \text{C}$ до температуры $t_0 = 0^\circ \text{C}$, равно $Q_1 = c_{\text{л}} m_{\text{л}} (t_0 - t_{\text{л}})$, где $c_{\text{л}}$ – удельная теплоёмкость льда.

Для плавления льда массой $m_{\text{л}}$ при температуре плавления необходимо количество теплоты $Q_2 : Q_2 = \lambda_{\text{л}} m_{\text{л}}$, где $\lambda_{\text{л}}$ – удельная теплота плавления льда.

Количество теплоты Q_3 , необходимое для нагревания получившейся при таянии льда холодной воды массой $m_{\text{л}}$ от температуры $t_0 = 0^\circ \text{C}$ до температуры t , равно $Q_3 = c_{\text{в}} m_{\text{л}} (t - t_0)$, где $c_{\text{в}}$ – удельная теплоёмкость воды.

Для количества теплоты Q_4 , отдаваемого тёплой водой и сосудом при охлаждении от $t_{\text{в}} = 20^\circ \text{C}$ до искомой температуры t , имеем $Q_4 = C(t_{\text{в}} - t)$.

Составим уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned} Q_{\text{пол}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 &= c_{\text{л}} m_{\text{л}} (t_0 - t_{\text{л}}) + \lambda_{\text{л}} m_{\text{л}} + c_{\text{в}} m_{\text{л}} (t - t_0) = \\ &= Q_{\text{отд}} = Q_4 = C(t_{\text{в}} - t). \end{aligned}$$

Решая это уравнение относительно t , получаем:

$$t = \frac{Ct_{\text{в}} - c_{\text{л}}m_{\text{л}}(t_0 - t_{\text{л}}) - \lambda_{\text{л}}m_{\text{л}} + c_{\text{в}}m_{\text{л}}t_0}{C + c_{\text{в}}m_{\text{л}}} \approx 1,5^{\circ}\text{C}.$$

Получившаяся температура больше 0°C , следовательно, сделанное предположение оказалось верным и в сосуде установится температура $1,5^{\circ}\text{C}$.

Задача 4. В электрический чайник налили холодную воду при температуре $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$. Через 8 минут после включения чайника вода нагрелась до температуры $t_2 = 80^{\circ}\text{C}$. Через какое время после начала нагрева испарится половина воды, первоначально находившейся в чайнике? Потерями теплоты и испарением воды при её нагревании до $t_3 = 100^{\circ}\text{C}$ пренебречь. Удельная теплота парообразования воды $L_{\text{в}} = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Решение. Пусть нагреватель чайника за одну минуту отдаёт окружающей его воде количество теплоты q . Тогда количество теплоты Q_1 , поступившее от нагревателя за время $\tau_1 = 8$ мин и нагрешее воду массой m от начальной температуры $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$ до температуры $t_2 = 80^{\circ}\text{C}$, равно $Q_1 = q\tau_1 = c_{\text{в}}m(t_2 - t_1)$.

$$\text{Отсюда для массы воды имеем: } m = \frac{q\tau_1}{c_{\text{в}}(t_2 - t_1)}.$$

Время τ_2 , необходимое для нагревания воды от температуры $t_2 = 80^{\circ}\text{C}$ до температуры кипения $t_3 = 100^{\circ}\text{C}$, получим из выражения: $Q_2 = q\tau_2 = c_{\text{в}}m(t_3 - t_2)$.

С учётом выражения для массы воды получаем

$$\tau_2 = \frac{Q_2}{q} = \frac{c_{\text{в}}m(t_3 - t_2)}{q} = \frac{(t_3 - t_2)}{(t_2 - t_1)}\tau_1 \approx 2,3 \text{ мин.}$$

Для испарения половины воды при температуре кипения требуется количество теплоты $Q_3 = 0,5mL_{\text{в}} = q\tau_3$, где τ_3 – необходимое для этого время. Отсюда для τ_3 находим:

$$\tau_3 = \frac{Q_3}{q} = \frac{0,5mL_{\text{в}}}{q} = \frac{0,5L_{\text{в}}}{c_{\text{в}}(t_2 - t_1)} \tau_1 \approx 30,8 \text{ мин.}$$

Таким образом, от начала нагрева воды до момента испарения половины воды пройдет $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \approx 41,1$ мин.

Задача 5. В калориметр, где находилась вода массой $M = 1$ кг при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$, опустили мокрый снег массой $m = 250$ г. После того, как снег растаял и установилось тепловое равновесие, в калориметре оказалась вода при температуре $t_2 = 5^\circ\text{C}$. Сколько воды содержалось в снегу? Теплоёмкостью калориметра и потерями теплоты пренебечь.

Решение. Конечное агрегатное состояние системы по условию задачи – вода. Мокрый снег (смесь льда и воды при температуре $t_0 = 0^\circ\text{C}$) получает теплоту от находящейся в калориметре тёплой воды.

Часть теплоты, подведённой мокрому снегу, идёт на плавление находящегося в снегу льда. Пусть масса льда равна $m_{\text{л}}$. Для плавления льда при температуре плавления ($t_0 = 0^\circ\text{C}$) необходимо количество теплоты Q_1 : $Q_1 = \lambda_{\text{л}} m_{\text{л}}$.

На нагревание получившейся из мокрого снега воды массой $m = 250$ г от температуры $t_0 = 0^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = 5^\circ\text{C}$ требуется количество теплоты Q_2 : $Q_2 = c_{\text{в}} m (t_2 - t_0)$.

Таким образом, суммарное количество теплоты $Q_{\text{пол}}$, получаемое мокрым снегом, а затем холодной водой, равно

$$Q_{\text{пол}} = Q_1 + Q_2 = \lambda_{\text{л}} m_{\text{л}} + c_{\text{в}} m (t_2 - t_0).$$

Вода, первоначально находившаяся в калориметре, охлаждается от температуры $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = 5^\circ\text{C}$, отдавая при этом количество теплоты $Q_{\text{отд}}$: $Q_{\text{отд}} = c_{\text{в}} M (t_1 - t_2)$.

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

$$Q_{\text{отд}} = c_{\text{в}} M (t_1 - t_2) = Q_{\text{пол}} = \lambda_{\text{л}} m_{\text{л}} + c_{\text{в}} m (t_2 - t_0).$$

Отсюда для массы $m_{\text{г}}$ льда, находившегося в мокром снегу, получаем
$$m_{\text{л}} = \frac{c_{\text{в}}M(t_1 - t_2) - c_{\text{л}}m(t_2 - t_0)}{\lambda_{\text{л}}} \approx 170 \text{ г.}$$

Масса же воды, содержащейся в мокром снегу, равна 80 г.

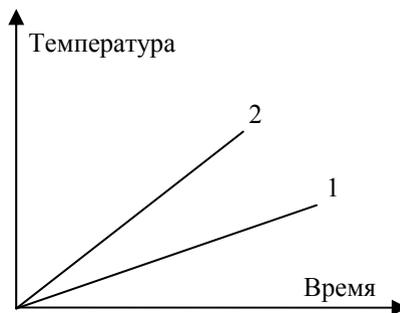
Контрольные вопросы

1. Можно ли обычным ртутным термометром измерить температуру одной капли горячей воды объёмом $V = 0,01 \text{ см}^3$?

2. При распиливании дерева пила всегда нагревается до более высокой температуры, чем дерево. Объясните, почему это происходит.

3. Почему кастрюля прогорает лишь после того, как вода выкипит?

4. На рисунке приведены графики зависимости от времени температуры двух брусков одинакового объёма: медного и свинцового. Оба бруска нагревались в одинаковых сосудах и на одинаковых горелках. Объясните какой из графиков построен для медного бруска, и какой для свинцового.



5. Иногда можно видеть, как хозяйка, желая ускорить варку, усиливает огонь под кастрюлей, в которой кипит вода. Правильен ли этот приём?

6. В каком отношении надо взять объёмы кубиков свинца и олова, чтобы их теплоёмкости были одинаковы?

7. В два одинаковых стакана с горячим чаем опустили одинаковые по массе ложки, в один стакан алюминиевую, а в другой серебряную. В каком стакане температура чая после этого будет ниже? Теплообменом с окружающим пространством пренебречь.

Задачи

1. Внутри герметичной камеры объёмом $V = 4 \text{ м}^3$ находится воздух при нормальном атмосферном давлении и температуре 0°C . За какое время небольшой нагреватель мощностью

$P = 1,5$ кВт прогреет воздух в камере до 20°C ? Потерями теплоты пренебречь.

2. До какой температуры была нагрета при закалке стальная пилка массой 200 г, если при опускании её в сосуд с маслом, через некоторое время в сосуде установилась общая температура 35°C ? Удельную теплоёмкость стали считать равной 500 Дж/(кг·К), а масла – 1700 Дж/(кг·К). Потерями теплоты и теплоёмкостью сосуда пренебречь. Начальная температура масла в сосуде 10°C , масса масла составляет 2 кг.

3. 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 $C_{\text{терм}}$ 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.

4. В железном калориметре массой 100 г находятся 600 г воды при температуре 20°C . В калориметр помещают свинец и алюминий общей массой 300 г и температурой 90°C . В результате температура в калориметре поднимается до 20°C . Определите массы свинца и алюминия. Удельная теплоёмкость свинца $c_{\text{св}} = 140$ Дж/(кг·К), удельная теплоёмкость алюминия $c_{\text{ал}} = 920$ Дж/(кг·К), удельная теплоёмкость железа $c_{\text{ж}} = 460$ Дж/(кг·К). Потерями теплоты пренебречь.

5. В сосуде в состоянии теплового равновесия находятся 3 л воды и 1 кг килограмм льда. Содержимое сосуда равномерно нагревают при нормальном внешнем давлении до 80°C , сообщая ему каждую минуту 8400 Дж теплоты. Начертите график зависимости температуры содержимого сосуда от времени. Пренебречь испарением воды, потерями теплоты и теплоёмкостью сосуда.

6. В калориметре находится вода массой $M_{\text{в}} = 2,5$ кг при температуре $t_{\text{в}} = 5^{\circ}\text{C}$. В калориметр помещают кусок льда массой $M_{\text{л}} = 700$ г. Когда установилось тепловое равновесие, оказалось, что масса льда увеличилась на $m = 64$ г. Определите начальную температуру льда. Потерями теплоты пренебречь.

7. В калориметр, где находится 1 кг льда при температуре -20°C , впускают $0,5$ кг водяного пара при температуре 100°C . Определить установившуюся температуру и агрегатное состояние системы. Нагреванием калориметра и потерями теплоты пренебречь.