

Кузьмичев Сергей Дмитриевич
Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Московского физико-технического института (МФТИ), преподаватель лицея №11 «Физтех», г. Долгопрудный.

В статье приводится краткая история создания первых жидкостных термометров, с физической точки зрения обсуждаются особенности их конструкции и возможности применения. На примерах ответов на вопросы и решения задач, связанных с термометрами, затрагиваются такие темы, как тепловое равновесие, тепловое расширение, теплоёмкость тела, уравнение теплового баланса.

Уважаемый термометр, …

Вместо предисловия

Уважаемый Термометр! При всей значимости для современной экспериментальной физики лазера, ускорителя элементарных частиц и туннельного микроскопа, Вы, без сомнения, есть одно из чудесных изобретений физики, которое, в свою очередь, во многом содействовало её успехам. Вы доставили нам большое число интересных знаний, которые были бы недостижимы без вашей помощи. И сейчас без Вас не обходятся не только физики и химики, но и биологи, метеорологи и врачи.

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.



Проделайте 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 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: 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 сравнения температур двух тел нет необходимости обязательно приводить их в соприкосновение друг с другом. Можно воспользоваться третьим телом, которое приводится сначала в контакт с первым телом, а затем со вторым.

Из опыта известно, что если некоторое тело C находится в тепловом равновесии с телами A и B, то тела A и B, приведенные в соприкосновение друг с другом, также будут находиться в тепловом равновесии. Следовательно, все три тела имеют одинаковые температуры.



Тело, служащее для сравнения температур двух или нескольких тел, называется термоскопом. Он позволяет сравнить температуру тела, с которым он в момент измерения находится в тепловом равновесии, с температурой другого интересующего нас тела. Рассматривая возможность применения термоскопа в той или иной ситуации, необходимо учитывать его тепловые характеристики. Так, например, при измерении температуры небольшого тела показания массивного термоскопа могут заметно отличаться от показаний маленького термоскопа.

Свидетельством изменения температуры термоскопа может служить изменение величин, характеризующих его физические свойства. От температуры зависят объем тела, сопротивление проводников и полупроводников, величина термоэлектрического тока, давление газа в сосуде, спектр теплового излучения нагретых тел и т.д. Так, при нагревании большинство тел расширяются, т.е. увеличивается их объем. Исключение составляет вода в интервале температур от $0°C$ до $4°C$.

Немного об истории создания термометра

Первый прибор для наблюдений за изменением температуры (термоскоп) изобрел в конце XVI века итальянский учёный Галилео Галилей. Термоскоп Галилея пред-

ставлял собой небольшой стеклянный шар (диаметром около 8 см) 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 (см. рис.1). Для удобства наблюдения за изменениями температуры прибор настраивался таким образом, чтобы в исходном состоянии столбик воды заполнял примерно половину трубки. Тело, температуру которого требовалось определить, приводилось в контакт с колбой (шаром) термоскопа. По мере нагревания или остывания колбы воздух в ней расширялся или сжимался и уровень воды в трубке 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.

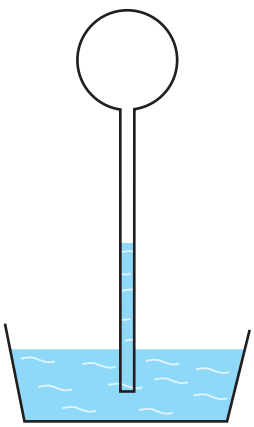


Рис. 1.

В течение XVII столетия многие исследователи занимались усовершенствованием этого прибора. Его снабдили измерительной шкалой, откачали воздух из резервуара, а сам резервуар запаяли и перевернули шариком вниз. Сама собой отпала необходимость в большом сосуде. С конца 50-х годов XVII века в качестве термометрической жидкости все чаще стали использовать винный спирт, не замерзающий при самых сильных морозах, обладающий небольшой вязкостью и сравнительно высоким коэффициентом теплового расширения (см.далее). Действие этого прибора основывалось на расширении спирта при нагревании, причем показания прибора не зависили от атмосферного давления. 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 размечать (градуировать) их шкалы. К концу XVII века все большую популярность приобретала идея построения температурной шкалы на основе использования двух постоянных температурных точек (реперных точек). До поры до времени был определенный произвол в выборе этих постоянных точек. Например, в качестве «постоянных» точек брали температуры самого жаркого летнего дня и самого холодного зимнего дня.

В начале XVIII века датский астроном О.Рёмер (в другой транскрипции Реомюр) изготовил термометр, в котором за постоянные точки своей температурной шкалы принял температуры замерзания и кипения воды.

Идеи Рёмера оценил Фаренгейт, который много работал над усовершенствованием конструкции термометра, подбирал наиболее подходящие сорта стекла, модифицировал шкалу, сделав её более удобной.

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 частей, причём первой точке присваивалось значение 32, а второй – 212. В наше время эти две температуры обозначили бы как $32^\circ F$ и $212^\circ F$ (обозначение $^\circ F$ означает, что температура указана в градусах 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 усовершенствованием 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 (K). 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 K и 373,15 K. Связь между температурой T по шкале Кельвина и температурой t по шкале Цельсия определяется соотношением $T = t + 273{,}15$. Увеличению температуры тела на один градус по шкале Кельвина соответствует увеличение температуры на один градус по шкале Цельсия.

Тепловое расширение

При изменении температуры тела изменяются его линейные размеры и объём. Уравнение, выражающее зависимость объёма тела от температуры, обычно записывают в виде

$$V = V_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \qquad (1)$$

где V_0 – объём тела при температуре $t_0 = 0^\circ C$, V – объём тела при температуре t градусов Цельсия, α – коэффициент объёмного расширения вещества. Данное соотношение является приближённым, поскольку не принимается во внимание зависимость коэффициента α от температуры. При расчётах по формуле (1) следует иметь в виду, что получаемые результаты могут быть достаточно точными только в интервалах температур, в которых изменения коэффициентов малы по сравнению с этими коэффициентами. В таблицах обычно приводятся средние значения коэффициентов объёмного расширения веществ с указанием интервала температур, для которых эти коэффициенты определены.

Для спирта, ртути и стекла, используемого при изготовлении термометров, средние значения коэффициентов теплового расширения при температуре $20^\circ C$ таковы:

$$\alpha_{сп} = 1{,}12 \cdot 10^{-3}\ K^{-1},$$

$$\alpha_{рт} = 0{,}18 \cdot 10^{-3}\ K^{-1},$$

$$\alpha_{ст} = 0{,}009 \cdot 10^{-3}\ K^{-1}.$$

Конструкция простейшего жидкостного термометра

Термометры, в которых для определения температуры используется явление теплового расширения жидкостей, называют жидкостными термометрами. Этот тип термометров наиболее знаком нам из повседневной жизни – это, например, медицинский и комнатный термометры.

Основные элементы конструкции такого термометра показанны на рис.2. В нём обычно используется одна из двух жидкостей – ртуть или спирт. Жидкость содержится в тонкостенной стеклянной колбе на конце длинной толстостенной капиллярной трубки. Стекло – плохой проводник тепла, поэтому стенки колбы делают тонкими, чтобы теплота быстро проходила через них и жидкость приобретала температуру среды, окружающей термометр.

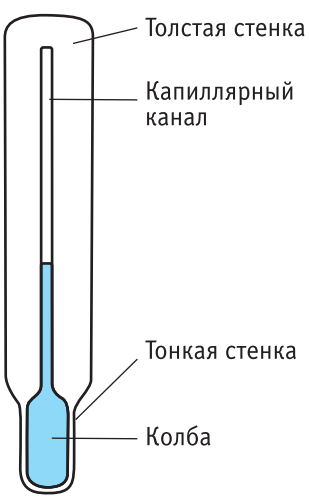


Рис. 2.

Поскольку колба мала, то канал капиллярной трубки должен быть очень узок, чтобы малое изменение температуры вызывало заметное перемещение столбика жидкости. Если вы посмотрите на трубку сломанного термометра, то вам потребуется увеличительное стекло, чтобы увидеть этот канал. Легко увидеть нить жидкости в термометре, поскольку толстостенная трубка действует как цилиндрическое увеличительное стекло.

Жидкостные стеклянные термометры не слишком точны, способны измерять температуру в небольшом диапазоне и легко разбиваются. Они могут давать более точные показания, если интервал между отметками на шкале увеличить. Этого можно достичь или увеличением размеров колбы, или применением капиллярной трубки с ещё более узким каналом, или же и тем, и другим. Если колба больше, то увеличение объёма жидкости будет больше для того же повышения температуры и ртуть продвинется по каналу дальше. Уменьшение размера канала даёт большую длину столбика жидкости для того же увеличения объёма и того же повышения температуры.

Область применения жидкостных термометров ограничена со стороны низких температур свойствами жидкостей, а со стороны высоких температур – свойствами и жидкости, и стекла. При понижении температуры все жидкости замерзают, а при высоких температурах жидкости кипят и стекло размягчается.

Спиртовые термометры применяются для измерения температуры в диапазоне от $-110^{\circ}C$ до $+50^{\circ}C$, а ртутные – в диапазоне от $-39^{\circ}C$ до $+600^{\circ}C$. Так как именно эти термометры чаще всего используются на практике, то имеет смысл кратко остановиться на преимуществах и недостатках использования ртути и спирта в термометрах.

Преимущества использования ртути в термометре следующие:

а) она не смачивает стенки трубки;

б) она хороший проводник тепла, и поэтому вся жидкость быстро прогревается и приобретает температуру окружающей среды;

в) она однородно расширяется;

г) имеет высокую точку кипения ($357^{\circ}C$ при нормальном атмосферном давлении);

д) она имеет низкую теплоемкость.

Недостатки использования ртути в термометре следующие:

а) она имеет высокую точку замерзания ($-39^{\circ}C$);

б) она имеет низкий коэффициент теплового расширения.

Преимущества использования спирта в термометре следующие:
а) он однородно расширяется;
б) он имеет высокий коэффициент теплового расширения;
в) он имеет низкую точку замерзания ($-115^\circ C$).

Недостатки использования спирта в термометре следующие:
а) он смачивает стенки трубки;
б) он имеет низкую точку кипения ($78^\circ C$ при нормальном атмосферном давлении).

Вопрос 1. (Ходят слухи, что этот вопрос кто-то прислал в редакцию журнала). Я любитель экстремального отдыха и в этом году решил впервые отправиться на отдых в Антарктиду. Собрал вещи, положив в рюкзак и ртутный термометр. И тут я засомневался. Прав ли я? Можно ли пользоваться ртутным термометром в Антарктиде?



Ответ. Сомнения Ваши не напрасны. Ртуть замерзает, т.е. переходит в твёрдое состояние, при температуре $-39^\circ C$. Следовательно, жидкостным ртутным термометром нельзя измерить температуры ниже $-39^\circ C$. В Антарктиде же температура опускается ниже $-50^\circ C$. Совет от журнала «Потенциал» тем, кто первый раз отправляется на отдых в Антарктиду и уже упаковал вещи, в том числе и ртутный термометр: выложите его. В Антарктиде от него мало пользы.

Вопрос 2. Из приведённых выше свойств ртути следует, что она кипит при температуре $+357^\circ C$. Как же могут применяться ртутные термометры для измерения температур до $+600^\circ C$?
Ответ. Дело в том, что эта температура ($+357^\circ C$) является температурой кипения ртути при нормальном атмосферном давлении. Известно, что при повышении давления температура кипения жидкости также повышается. При давлении в 4 атм температура кипения ртути составляет $+450^\circ C$, а при давлении в 30 атм она повышается до $+500^\circ C$. Поэтому для измерения температур выше $+357^\circ C$ необходимо, чтобы ртуть в капилляре термометра находилась под давлением выше нормального атмосферного давления. С этой целью капилляр заполняют газом. Давление газа может доходить до 70 атм. Чтобы выдержать такое давление, стенки капилляра должны быть толстыми.

Вопрос 3. Почему разрушается ртутный медицинский термометр, если его колбу нагреть до температуры выше $43^\circ C$?
Ответ. Тепловые свойства ртути определяются не только коэффициентом теплового расширения α. Важной характеристикой ртути является термический коэффициент давления, показывающий на сколько необходимо увеличить давление на поверхность тела при нагревании его на $1^\circ C$ при условии, что объём тела поддерживается постоянным. Для ртути значение этого коэффициента составляет $46\ K^{-1}$. Это означает, что для сохранения объёма ртути при нагревании от $0^\circ C$ до $1^\circ C$ требуется увеличение давления приблизительно на 46 атмосфер.

Максимальное значение температуры на шкале ртутного медицинского термометра составляет $+42^\circ C$. При этой температуре ртуть заполняет весь доступный ей объём термометра. При попытке дальнейшего

нагрева давление ртути на стенки колбы и капилляра существенно увеличивается и механической прочности стенок может попросту не хватить, чтобы выдержать давление в несколько десятков атмосфер.

Задача 1. Найти объём колбы ртутного термометра при температуре $0^{\circ}C$, если известно, что при этой температуре ртуть заполняет только колбу, а между минимальным делением $0^{\circ}C$ и максимальным $100^{\circ}C$ объем канала термометра равен $V = 3\,мм^3$. Коэффициент объёмного расширения ртути $\alpha_{рт} = 1{,}8 \cdot 10^{-4}\ K^{-1}$, коэффициент объёмного расширения стекла $\alpha_{ст} = 9 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$.

Решение. Пусть V_0 – объём ртути в термометре при $t_1 = 0^{\circ}C$. Таков же и внутренний объём колбы термометра. Общий объём колбы и канала термометра при температуре $t_1 = 0^{\circ}C$ составляет $V_1 = V_0 + V$. При нагревании до температуры $t_2 = 100^{\circ}C$ объём колбы и канала увеличится и составит

$$V_2 = V_1 \cdot (1 + \alpha_{ст} t_2) = (V_0 + V) \cdot (1 + \alpha_{ст} t_2).$$

Объём ртути при температуре t_2 равен

$$V_{2,рт} = V_0 \cdot (1 + \alpha_{рт} t_2).$$

Из текста задачи следует, что при нагревании ртути до температуры t_2 столбик ртути поднимается до максимального деления, т.е. ртуть занимает весь предоставленный ей объём колбы и канала. Следовательно, $V_2 = V_{2,рт}$, что позволяет записать равенство

$$(V_0 + V) \cdot (1 + \alpha_{ст} t_2) = V_0 \cdot (1 + \alpha_{рт} t_2).$$

Из этого соотношения для V_0 находим

$$V_0 = \frac{V \cdot (1 + \alpha_{ст} t_2)}{(\alpha_{рт} - \alpha_{ст}) t_2} \approx 176\,мм^3.$$

Задача 2. Полагая, что капиллярный канал термометра имеет круглое сечение, оцените диаметр капиллярного канала ртутного термометра для измерения температуры воды в диапазоне от $0^{\circ}C$ до $100^{\circ}C$ и ртутного медицинского термометра. Объем ртути при $0^{\circ}C$ в медицинском термометре равен $126\,мм^3$, а в термометре для измерения температуры воды $101\,мм^3$. Длина капиллярного канала в медицинском термометре равна $62\,мм$, а в термометре для измерения температуры воды $120\,мм$.

(Примечание: на самом деле капиллярный канал медицинского термометра имеет треугольное сечение.)

Решение. Воспользуемся законом теплового расширения (1). Значения коэффициентов теплового расширения для ртути $(\alpha_{рт})$ и стекла $(\alpha_{ст})$ возьмём из предыдущей задачи.

В термометре ртуть находится в стеклянном сосуде, объём которого при нагревании увеличивается. Начальный внутренний объём термометра можно представить как сумму объёма колбы и объёма капиллярного канала. До нагревания ртуть находится только в колбе. Начальный внутренний объём термометра ненамного превышает объём ртути, т.к. объём капиллярной трубки заметно меньше объёма колбы (см. предыдущую задачу). Коэффициент теплового расширения ртути существенно больше коэффициента теплового расширения стекла $(\alpha_{рт} = 20\alpha_{ст})$. Следовательно, при нагревании термометра изменение объёма ртути заметно больше изменения внутреннего объёма термометра.

Таким образом, в условиях данной задачи можно пренебречь изменением объёма сосуда, в котором находится ртуть, и считать его постоянным. Для объёмов ртути при температурах t_1 и t_2 $(t_2 > t_1)$ получаем

$$V_{1,рт} = V_{0,рт} \cdot (1 + \alpha_{рт} \cdot t_1),$$

$$V_{2,рт} = V_{0,рт} \cdot (1 + \alpha_{рт} \cdot t_2),$$

С другой стороны

$$V_{2,рт} - V_{1,рт} = L \cdot S.$$

Здесь L – смещение столбика ртути по капиллярной трубке при нагревании от t_1 до t_2, S – площадь поперечного сечения канала. Имеем

$$V_{2,рт} - V_{1,рт} = V_{0,рт} \cdot \alpha_{рт} \cdot (t_2 - t_1).$$

Тогда для площади S получаем

$$S = \frac{V_{0,рт} \cdot \alpha_{рт} \cdot (t_2 - t_1)}{L}.$$

Для капиллярного канала круглого сечения диаметром d справедливо соотношение $S = \pi d^2 / 4$.

Отсюда для диаметра канала d получаем

$$d = \sqrt{\frac{4V_{0,рт} \cdot \alpha_{рт} \cdot (t_2 - t_1)}{\pi L}}. \quad (2)$$

Для медицинского термометра $t_1 = 35°C$, $t_2 = 42°C$. Для термометра для измерения температуры воды $t_1 = 0°C$, $t_2 = 100°C$. В этом случае смещение столбика ртути равно длине капиллярного канала.

Проведенные по формуле (2) расчёты дали следующие результаты для поперечных размеров капилляров термометров:

$$d_{мед} \approx 0{,}06 \text{ мм},$$

$$d_{вод} \approx 0{,}14 \text{ мм}.$$

Максимальный термометр

Максимальный термометр отмечает наивысшую температуру окружающей среды, которую она достигает за данный период времени.

Очень важным максимальным термометром является медицинский термометр, который применяется для определения температуры тела человека. В таком термометре в качестве жидкости используется ртуть. Стеклянные стенки колбы очень тонки, поэтому ртуть быстро приобретает температуру тела. Канал капиллярной трубки очень узок, этим достигается большое изменение длины столбка ртути при малом изменении температуры.

Обычный жидкостный термометр можно превратить в максимальный путем небольшого, но весьма важного изменения его конструкции. В месте, где колба термометра соединяется с капиллярной трубкой, делают сужение капиллярного канала

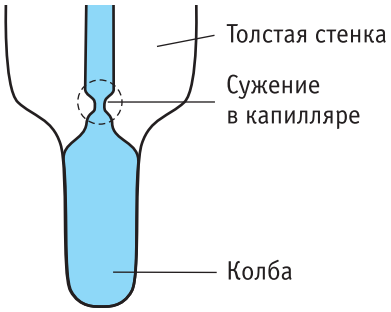


Рис. 3.

(см.рис.3). Наличие сужения в капиллярном канале сказывается на поведении ртути следующим образом.



Когда температура возрастает, то расширение сравнительно большого объема ртути в колбе способствует проталкиванию ртути через сужение вверх по трубке. Когда термометр забирают у пациента, то ртуть охлаждается и ее объем уменьшается. Силы сцепления между молекулами ртути недостаточно сильны, чтобы втянуть ртуть обратно через сужение, и столбик ртути в месте сужения разрывается. Таким образом, ртуть в капиллярной трубке не может попасть обратно в колбу, и зафиксируется максимальная температура.

Процесс установления показаний термометра

Если два тела с разными температурами привести в контакт друг с другом, то с течением времени температуры этих тел изменятся. Одно тело при этом нагреется, а другое остынет. Нагревание одного тела и охлажде-

ние 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 месте 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 теплоты, а сам процесс перехода теплоты 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 теплоты от горячего тела к холодному. Когда же температуры тел выравниваются, теплопередача прекращается и наступает тепловое равновесие.

Когда, например, термометр для измерения температуры воды помещается в сосуд с горячей водой, происходит передача теплоты через стеклянные стенки от воды к ртути в колбе. От чего зависит количество теплоты, передаваемое через 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. Через стенку с большей площадью за определенный промежуток времени можно передать большее количество теплоты, чем через стенку с меньшей площадью за тот же промежуток времени. 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. Стекло не является хорошим проводником тепла.

Вопрос 4. Почему для измерения температуры человека медицинским термометром требуется довольно продолжительное время (от 5 до 10 минут)?
Ответ. Процедура измерения любой физической величины требует некоторого времени. Продолжительность такой процедуры зависит от метода, используемого при измерении, и характеристик измерительного устройства.

При измерении температуры человека медицинским термометром необходимо дождаться установления теплового равновесия: температура термометра должна сравняться с температурой тела человека. Для нагрева термометра, а значит и ртути, требуется сообщить ему некоторое количество теплоты. Передача теплоты от тела человека к ртути в колбе происходит через тонкие стеклянные стенки колбы. В первый момент разность температур термометра и человека значительна, к ртути подводится много теплоты и она быстро расширяется. Когда же температура термометра становится близкой к температуре тела, то нагревание термометра происходит медленно и ртуть расширяется также медленно. Поэтому требуется значительное время для того, чтобы термометр нагрелся до температуры тела человека.

Вопрос 5. Как измерить медицинским термометром температуру тела человека, если температура окружающего воздуха равна $42^{\circ}C$?
Ответ. Можно предварительно охладить термометр в холодильнике и «стряхнуть». Если холодильника нет, то нужно подержать термометр «под мышкой» в течение долгого времени, извлечь его и сразу же «стряхнуть». Термометр покажет температуру тела человека. Операция «стряхивания» позволяет механически переместить ртуть из капиллярной трубки через сужение в капилляре в освободившееся при охлаждении место в колбе термометра.

Теплоёмкость термометра

Термометр, как и любой физический измерительный прибор, рассчитан на использование в конкретных оптимальных условиях. Если реальные условия не являются таковыми, то его показания могут существенно отличаться от реальной температуры тела. Ранее уже обсуждалось, в каких температурных диапазонах можно использовать ртутный или спиртовой термометр. Еще одно важное условие, которое необходимо соблюсти при измерении, можно сформулировать, анализируя процедуру измерения.

Допустим, что требуется определить температуру некоторой порции воды, имеющей температуру $t_в$. В нашем распоряжении имеется термометр, имеющий некоторую теплоёмкость и температуру $t_т$ (пусть для определённости $t_в > t_т$).

При опускании термометра в воду начинается теплообмен между водой и термометром. Спустя некоторое время теплообмен прекратится, установится тепловое равновесие, температуры воды и термометра сравняются. При этом температура воды уменьшится и будет отличаться от первоначальной. Пусть установившаяся температура равна $t_{изм}$. Именно это значение температуры «покажет» нам термометр. На сколько могут отличаться $t_{изм}$ от $t_в$? Рассмотрим следующую задачу.

Задача 3. Для измерения температуры воды, имеющей массу $m_в = 66$ г, в нее погрузили термометр, который показал $t_{изм} = 32{,}4^\circ C$. Какова начальная температура t_1 воды, если теплоёмкость термометра равна $C_т = 1{,}9$ Дж/К и перед погружением в воду он показывал температуру в помещении, равную $t_2 = 17{,}8^\circ C$?

Решение. В этом тепловом процессе в тепловой контакт приводятся два тела (термометр и вода), имеющие различные температуры. Через некоторое время в этой системе установится тепловое равновесие. В процессе перехода в тепловое равновесие одно тело (в данном случае – вода) будет отдавать теплоту (суммарное количество теплоты $Q_{отд}$), другое тело (термометр) будет получать теплоту (суммарное количество теплоты $Q_{пол}$). Допустим, что потерь теплоты нет, т.е. термометр и вода не обмениваются теплотой с окружающим пространством, а только между собой. Тогда можно записать уравнение теплового баланса: $Q_{отд} = Q_{пол}$.

Определим количество отданной теплоты $Q_{отд}$. Вода массой $m_в = 66$ г охлаждается от начальной температуры t_1 (искомая величина) до температуры $t_{изм} = 32{,}4^\circ C$, отдавая при этом количество теплоты

$$Q_{отд} = m_в c_в (t_1 - t_{изм}),$$

где $c_в = 4200$ Дж/(кг·K) – удельная теплоёмкость воды.

Определим количество полученной теплоты $Q_{пол}$. Оно определяется теплотой, полученной термометром при его нагревании от начальной температуры $t_2 = 17{,}8^\circ C$ до температуры $t_{изм} = 32{,}4^\circ C$:

$$Q_{пол} = C_т (t_{изм} - t_2).$$

Подставляя полученные выражения в уравнение теплового баланса, получаем для начальной температуры воды:

$$t_1 = t_{изм} + \frac{C_т (t_{изм} - t_2)}{m_в c_в}.$$

Из полученного выражения видно, что разность между начальной и измеренной температурами зависит от отношения теплоёмкости термометра $C_т$ к теплоёмкости воды $C_в = m_в c_в$. Для указанных в тексте задачи данных начальная температура воды составит $32{,}5^\circ C$, т.е. отличается от измеренной всего на $0{,}1^\circ C$. А вот если бы масса воды была в десять раз меньше (6,6 г), то отличие измеренной температуры от начальной составило бы уже заметную величину, равную $1^\circ C$.

Данный пример показывает, что для точного измерения температуры некоторого тела необходимо, чтобы теплоёмкость термометра была значительно меньше теплоёмкости тела.