

## 10. Энтропия и поток энтропии

Второй большой раздел физики, к которому мы обратимся, - это учение о теплоте. Уже по названию можно сказать, что речь идет об описании явлений, связанных с теплыми или холодными предметами и телами. По аналогии с механикой, где всегда рассматривается баланс импульса, в учении о теплоте мы постоянно будем иметь дело с балансом тепла.

Учение о теплоте важно для понимания явлений природы и устройства технических приборов и машин.

Жизнь на Земле стала возможной только благодаря гигантскому потоку тепла, который приходит от Солнца. Климат и погода на Земле определяются главным образом тепловыми процессами. (Под “тепловым” понимается здесь “относящееся к учению о теплоте”).

Очень многие машины действуют в результате применения законов учения о теплоте: автомобильный двигатель, паровая турбина электростанции, тепловой насос холодильника.

Тепловые потери в каждом доме и согревание его с помощью отопления можно численно описать средствами учения о теплоте.

Не следует забывать важную роль, которую играет теплота при протекании химических реакций.

Таким образом, в учении о теплоте речь идет о других явлениях, чем в механике. По этой причине в учении о теплоте используются другие физические величины. Но это не значит, что, занимаясь учением о теплоте, механику можно совершенно забыть. Во-первых, имеются величины, которые используются как в механике, так и в учении о теплоте: например, энергия и сила тока энергии. И, во-вторых, имеются законы, соотношения и правила в механике, для которых существует тепловая область применения. Поэтому не надо совершенно заново учиться, чтобы понять учение о теплоте.

### 10.1 Энтропия и температура

Каждый раз, когда приступают к новой области физики, следует, прежде всего, познакомиться с ее важнейшими средствами:

физическими величинами, с которыми придется работать. В механике мы начали с двух величин, позволяющих описать состояние движения некоторого тела: скорости и импульса. В соответствии с этим учение о теплоте начнем с двух величин, которые описывают тепловое состояние тела.

Одну из этих величин, температуру, ты уже знаешь. Для краткости ее обозначают греческой буквой  $\vartheta$  (называется тета) и измеряется она в  $^{\circ}\text{C}$  (т.е. в градусах Цельсия). Поэтому утверждение “температура составляет 18 градусов Цельсия” можно записать кратко:

$$\vartheta = 18^{\circ}\text{C}.$$

Также вторую величину, в которой мы нуждаемся, ты уже знаешь, однако, под другим именем, отличным от применяемого в физике. Речь идет о том, что в разговорном обиходе называется “количеством теплоты”, или просто “теплотой”. Чтобы показать различие между количеством теплоты и температурой, проделаем совсем простой опыт (см. рис. 10.1). Пусть в стакане А находится 1л воды, имеющий температуру  $80^{\circ}\text{C}$ . Перельем половину этой воды в пустой стакан В. Что произойдет при этом с температурой и количеством теплоты? Температура воды в обоих стаканах А и В после переливания будет такой же, как и в стакане А до переливания. Количество теплоты, напротив, после переливания разделится между стаканами А и В. Если вначале в стакане А было 10 тепловых единиц, то в конце 5 единиц в А и 5 в В.

Температура характеризует, таким образом, состояние теплоприсутствия (или холодоприсутствия) в некотором теле независимо от его размера. Количество теплоты, напротив, есть нечто содержащееся в теле.

Разговорное выражение количество теплоты в физике заменяется специальным понятием: оно называется энтропией. Обозначается эта величина символом  $S$ , а ее единицами измерения являются Карно (Carnot) или сокращенно Ст. Если содержание энтропии в некотором теле составляет 20 Карно, то тогда можно написать:

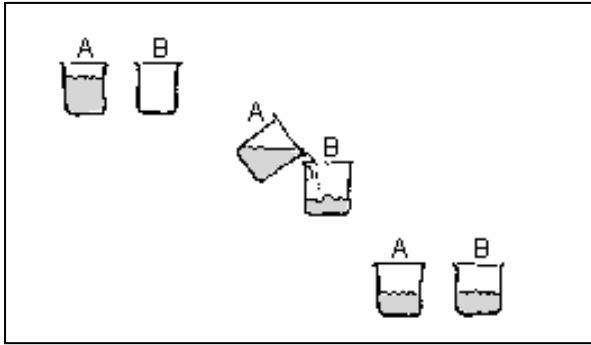


Рис. 10.1. Половина воды из стакана А переливается в стакан В

$$S = 20 \text{ Ct.}$$

Единицы измерения названы в честь физика Сади Карно (1796-1832), внесшего существенный вклад в открытие энтропии.

При дальнейшем изучении свойств энтропии ты должен всегда помнить, что речь при этом идет о разговорном слове теплота.

Сравним два стакана с водой на рис. 10.2. Пусть в обоих стаканах одинаковое количество воды. Вода в левом стакане горячая и ее температура равна  $70^\circ\text{C}$ , а вода в правом стакане прохладная и ее температура составляет  $10^\circ\text{C}$ . Какой стакан содержит больше энтропии? (В каком стакане находится больше тепла?) Естественно, в левом.

Чем выше температура тела, тем больше энтропии оно содержит.

Сравним стаканы с водой на рис. 10.3. Здесь температура воды одинакова, а масса воды справа и слева неодинакова. В каком стакане энтропия больше? Опять в левом стакане.

Чем больше масса тела, тем больше энтропию содержит оно.

В каком из стаканов на рис. 10.4 содержится большая энтропия мы не можем сказать в данный момент.

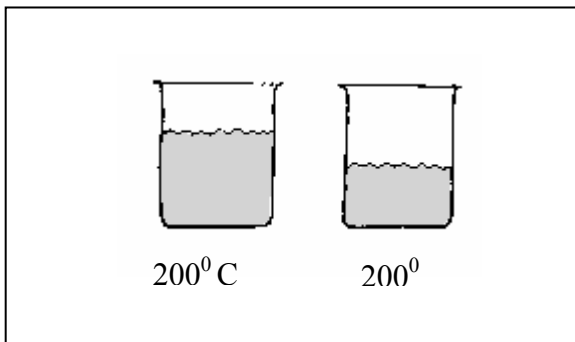


Рис. 10.3. Вода в левом стакане содержит больше энтропии, чем в правом

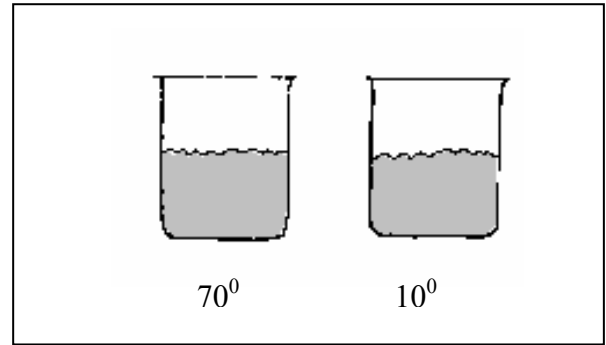


Рис. 10.2. Вода в левом стакане содержит больше энтропии, чем в правом

Рассмотрим еще раз опыт подобный приведенному на рис. 10.1. Пусть в стакане А находится 1 л воды с энтропией 4000 Ct. Перельем  $\frac{1}{4}$  воды, т.е. 250 мл воды, в пустой стакан В. Сколько энтропии находится после переливания в стакане А и сколько в стакане В? При переливании энтропия разделяется между стаканами в такой же пропорции, как и количество воды. При этом в стакан В будет перенесено 1000 Ct, а в стакане А останется 3000 Ct.

Как можно себе представить величину 1 Карно? Идет ли речь о большой или маленькой энтропии? Тебе известно, что для плавления льда необходимо “тепло” или энтропия. 1 Карно это такое количество энтропии, которое необходимо для плавления  $0,893 \text{ см}^3$  льда. Отсюда можно сделать грубую оценку для запоминания:

1 Карно расплавляет приблизительно  $1 \text{ см}^3$  льда.

#### Задачи

1. В комнате А объемом  $75 \text{ м}^3$  температура воздуха равна  $25^\circ\text{C}$ . В комнате В объемом  $60 \text{ м}^3$  температура воздуха составляет  $18^\circ\text{C}$ . В какой комнате энтропия воздуха больше?

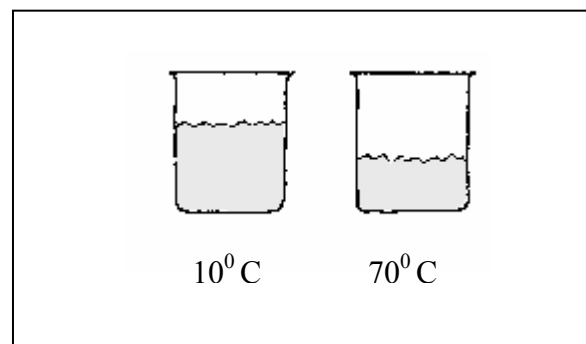


Рис. 10.4. Здесь нелегко выяснить в каком стакане содержится больше энтропии

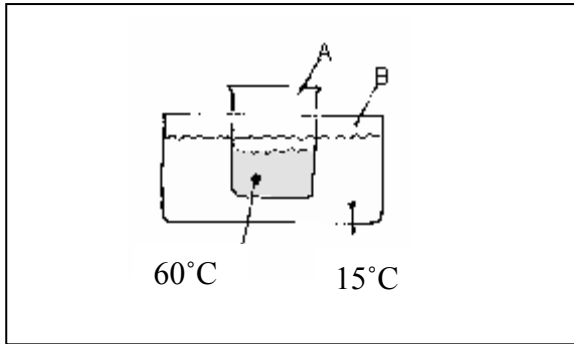


Рис. 10.5. Энтропия перетекает из внутреннего сосуда А во внешний сосуд В

Энтропия кофе в заполненном кофейнике равна 3900 Ст. В три чашечки было налито одинаковое количество кофе. После этого кофейник оказался заполненным наполовину. Сколько энтропии осталось в кофейнике? Сколько энтропии содержит каждая чашечка с кофе?

## 10.2 Различие температур как причина возникновения потока энтропии

Поместим сосуд А с горячей водой в сосуде В с холодной водой (рис. 10.5). Мы хотим путем наблюдения узнать, что произойдет и потом объяснить опыт.

В начале наблюдения температура воды в сосуде А уменьшается, а воды в В возрастает. Температуры сближаются по величине и, наконец, становятся одинаковыми. Температура в В не становится выше, чем в А.

И теперь объяснение: энтропия перетекает из А в В до тех пор, пока температуры не станут одинаковыми.

Опыт можно повторить с другими сосудами (рис. 10.6 а и б.). При этом всегда в обоих сосудах устанавливается одинаковая температура. В случае на рис.10.6а конечная температура немного отличается от начальной температуры в В, а в случае рис. 10.6 б лежит вблизи начальной температуры А. Общим для этих случаев является то, что, в конце концов,

$$T_A = T_B.$$

Разумеется, можно начать с того, что внутренний сосуд А будет иметь более низкую, а наружный сосуд более высокую температуру. Но и в этом случае температуры будут сближаться до тех пор, пока не станут

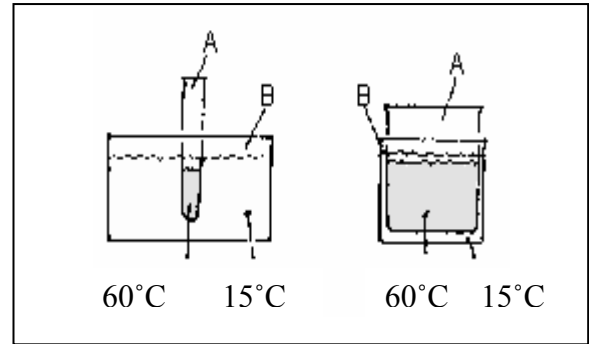


Рис. 10.6. В обоих случаях энтропия перетекает из внутреннего во внешний сосуд

равными по величине. Отсюда мы заключаем, что энтропия перетекает сама собой от мест с более высокой к местам с более низкой температурой.

Наверняка это утверждение покажется знакомым. Если ты полистаешь книгу вперед, то найдешь для него еще два других варианта. (И также, листая назад, оно нам встретится).

Разность температур  $T_A - T_B$  можно рассматривать как причину для потока энтропии.

Разница температур является причиной для потока энтропии.

То, что поток энтропии в опытах на рис.10.5 и 10.6, наконец, прекращается, легко понять: как только температуры становятся одинаковыми, причина для потока энтропии исчезает. Состояние равенства температур во всех частях, которое устанавливается в конце концов, называется тепловым равновесием.

Перед тобой стоит чашка с чаем. Чай еще слишком горяч для питья. Ты ожидаешь пока он остынет. Что происходит обычно при остывании? Так как вначале температура чая выше, чем у воздуха и у стола, поток энтропии течет из чая в окружающую среду. Становится ли окружение из-за этого теплее? Если очень точно отвечать, то да. Однако энтропия, исходящая из чая, распространяется так далеко, разрежается так сильно, что ее практически невозможно больше заметить.

Мы прикасаемся к различным предметам в классе. Некоторые из них кажутся нам холодными: металлические детали парты, бетонные столбы. Другие представляются менее холодными, например, деревянные части парты. Третьи вызывают ощущение приятной теплоты: шерстяные перчатки или кусок пенопласта. Температура железного

предмета кажется нам более низкой, чем у деревянного. Это наблюдение ты должен просто принять во внимание. Мы же уже точно сформулировали: “Энтропия перетекает сама по себе от места с более высокой к месту с более низкой температурой”. Поэтому энтропия должна постоянно перетекать от деревянных деталей парты к металлическим. Из-за этого железо будет становиться все более теплым, а дерево более холодным до . . . ? До достижения равенства температур.

Прежде чем философствовать дальше, мы определим температуры разных предметов в классе с помощью прибора для измерения температуры, чтобы не полагаться только на одни чувства. Результат будет поразительным. Все измеренные температуры будут одинаковые. Железо, дерево и пенопласт имеют одну и ту же температуру при условии, что эти предметы достаточно долго находились в одном помещении и их температуры успели выровняться.

Только зимой тела, которые находятся в комнате более высоко, имеют большую температуру, чем тела, расположенные более низко. Это вызвано тем, что от отопительного устройства нагретый воздух поднимается вверх. Поэтому установление теплового равновесия из-за отопления постоянно нарушается. Летом же, напротив, равновесие, в общем, устанавливается хорошо. Отсюда мы приходим к выводу: наше чувство “тепла” и “холода” вводит нас в заблуждение. Как это заблуждение возникает и почему на самом деле чувство не обманывает ты узнаешь в одном из последующих разделов.

### Задачи

- (а) При варке энтропия переходит из плитки в кастрюлю. Почему?  
 (б) Кастрюля поставлена на подставку на столе.

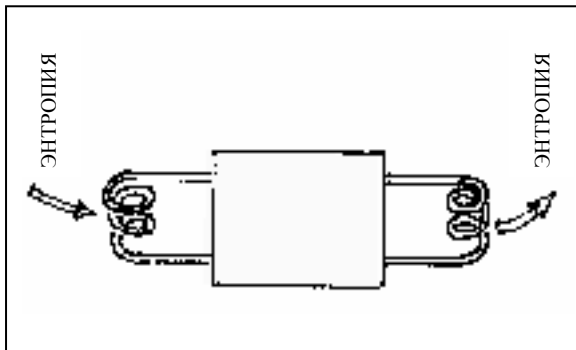


Рис. 10.7. Тепловой насос имеет один вход и один выход для энтропии

Энтропия при этом переходит из кастрюли в подставку. Почему?

- (с) Охлажденная бутылка колы поставлена на стол. Стол на том месте, где стоит бутылка, охладился. Почему?

Большой металлический брусок А нагрет до  $120^{\circ}\text{C}$ , а маленький брусок В из того же металла имеет температуру  $10^{\circ}\text{C}$ . Эти бруски соединены так, что энтропия может перетекать из одного в другой. От какого бруска к какому будет перетекать энтропия? Конечная температура будет ближе к  $120^{\circ}\text{C}$  или к  $10^{\circ}\text{C}$ ?

Перед тобой лежит маленький горячий металлический брусок и большой холодный. (а) Можешь ли ты сказать какой из них содержит больше энтропии? (б) Ты приводишь бруски в контакт. Что при этом происходит с температурой и энтропией? (с) Какой из брусков в итоге будет содержать большую энтропию?

## 10.3 Тепловой насос

Переход энтропии самой по себе от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой вовсе не означает, что она вообще не может протекать в обратном направлении, т.е. от холодного к теплomu. Она может это, но только не “сама по себе”. Чтобы это сделать, надо “власть употребить”: необходимо иметь насос для энтропии. Такое название для некоторого прибора возникло по аналогии с тепловым насосом.

Сегодня в каждом доме имеется тепловой насос: он является составной частью холодильника и служит для того, чтобы энтропию из внутренней части холодильника удалить наружу. Прежде чем холодильник рассмотрим подробнее, мы должны выяснить некоторые принципиальные моменты для теплового насоса.

Как и всякий насос, тепловой насос имеет два вывода чтобы иметь возможность что-либо перекачивать: вход и выход. Водяной насос имеет один вход и один выход для воды, насос для импульса имеет один вход и один выход



Рис. 10.8. Холодильник сзади. Видны тепловой насос и змеевик, через который энтропия покидает холодильник

для импульса. Соответственно, тепловой насос имеет один вход и один выход для энтропии (рис.10.7). Как вход, так и выход являются змеевиками (спиральными трубками), по которым протекает жидкость или газ. Таким способом в тепловой насос вносится или выводится из него энтропия.

**Тепловой насос переправляет энтропию из места с более низкой в место с более высокой температурой.**

Некоторое тело остывает, если от него отводится энтропия; тело нагревается, если к нему подводится энтропия. На рис. 10.7 показано, что тепловой насос можно использовать как для охлаждения, так и для нагревания. Фактически тепловой насос предназначен для обеих целей.

Рассмотрим более подробно устройство холодильника (рис. 10.8). Тепловой насос находится внизу, в задней части холодильника. Также сзади можно увидеть выход энтропии: это змеевик, который занимает большую часть обратной стороны холодильника. Чтобы энтропия быстрее передавалась воздуху, между трубками змеевика находится металлическая решетка. То, что в этом месте энтропия выходит из холодильника, обнаруживается по нагретости змеевика пока работает холодильник. Вход для энтропии находится внутри холодильника: это змеевик, вмонтированный в морозильную камеру.

Некоторые дома отапливаются с помощью теплового насоса. В этом случае энтропия забирается из наружного воздуха или, если имеются, из мимо протекающего ручья или реки. Также вода в некоторых купальнях подогревается таким образом.

Другое устройство, в котором применяется тепловой насос, известно как кондиционер. Кондиционер устанавливает внутри здания определенную температуру и влажность воздуха. При этом воздух в помещении среди прочего может также охлаждаться и делается это с помощью теплового насоса. На рис. 10.9 изображен простейший кондиционер, который может только охлаждать воздух внутри помещения.

**Задачи**

1. Исследуй холодильник у себя дома. Найди тепловой насос, вход и выход для энтропии. Подержи руку на змеевике выхода для энтропии.

2. Что произойдет с энтропией, если дверца холодильника будет открыта продолжительное время?

## 10.4 Абсолютная температура

Сколько энтропии можно выкачать из некоторого тела? Сколько энтропии содержит оно? Сначала мы должны выяснить, что речь здесь идет о двух разных вещах.

Если имеется только положительная энтропия, то из некоторого тела можно выкачать столько энтропии, сколько в него было этой энтропии помещено. Аналогично тому, как из некоторого сосуда нельзя выкачать воздуха больше, чем там было.

Все было бы иначе, если бы существовала отрицательная энтропия. Тогда из некоторого тела можно было бы извлекать энтропию даже при ее содержании нуль Карно: если бы отвели, например, еще 5 Карно, то энтропия тела была бы минус 5 Карно. Что такое возможно, мы знаем на примере импульса: даже у покоящегося тела, т.е. у тела с импульсом нуль Гюйгенсов, можно отнять импульс; тогда его импульс будет отрицательным.

Поэтому мы можем поставленные вопросы сформулировать иначе: существует ли отрицательная энтропия? (Наверно при этом можно сказать, что отрицательную энтропию на разговорном языке можно назвать “холодом” или “количеством холода”)

В принципе ответ на этот вопрос легко найти. Единственное, что надо для этого иметь, это хороший тепловой насос. Надо взять какое-нибудь тело, например, кирпич, и откачивать энтропию пока это возможно. Если вначале мы попробуем с холодильником, то температура этого кирпича опустится, возможно, до  $-5^{\circ}\text{C}$ . Дальше не получится, т.к. тепловой насос холодильника ничего больше сделать не может. Большую энтропию можно отвести, если поместить кирпич в морозильную камеру: тогда температура понизится до приблизительно  $18^{\circ}\text{C}$ . Есть, однако, получше (и, естественно, дороже) тепловые насосы. С их помощью достигаются еще более низкие температуры. Такие тепловые насосы называются машинами холода. Существуют машины холода, которые позволяют довести температуру кирпича до  $-200^{\circ}\text{C}$ . При такой температуре воздух становится жидким. Фактически такие машины можно использовать для сжижения воздуха. Есть машины

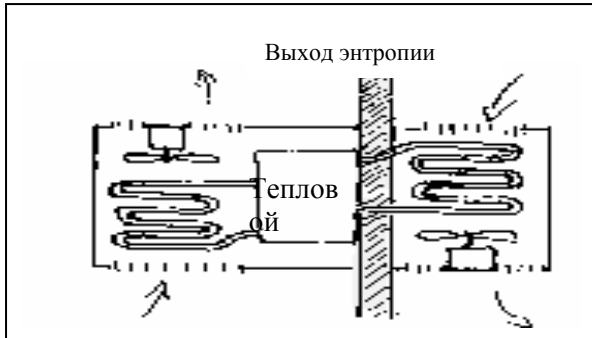


Рис. 10.9. Простейший кондиционер. Продувание воздуха снаружи и внутри помещения сделано для того, чтобы улучшить обмен теплом с воздухом

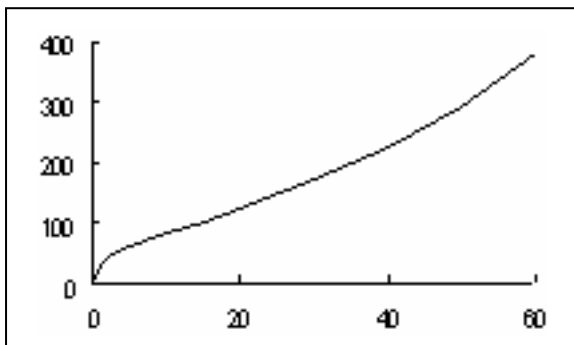


Рис. 10.11. Температура как функция содержания энтропии в 100 г меди

холода, позволяющие еще больше энтропии отвести от кирпича. Об этом известно потому, что температура падает еще ниже. Так достигают  $-250^{\circ}\text{C}$ , потом  $-260^{\circ}\text{C}$ , и с еще большими затратами  $-270^{\circ}\text{C}$ ,  $-271^{\circ}\text{C}$ ,  $-272^{\circ}\text{C}$ ,  $-273^{\circ}\text{C}$ . При  $-273,15^{\circ}\text{C}$  такое понижение прекращается. Несмотря на огромные усилия и использование всех средств эту температуру не удалось перешагнуть.

Объяснение этому просто: при такой температуре у кирпича нет больше энтропии; энтропия не может принимать отрицательные значения.

Наименьшая температура, которую может иметь тело, равна  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . При этой температуре тело не обладает энтропией.

При  $T_A = -273,15^{\circ}\text{C}$  имеем  $S = 0 \text{ Ст}$ .

После открытия в природе наинизшей температуры вполне естественно было ввести новую шкалу температур. Эта новая абсолютная шкала температур просто смещена по отношению к шкале Цельсия: ее нулевая точка совпадает с  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Абсолютную температуру обозначают символом  $T$ , ее единица измерения – кельвин, сокращенно  $\text{K}$ . На рис. 10.10 показано как обе шкалы связаны

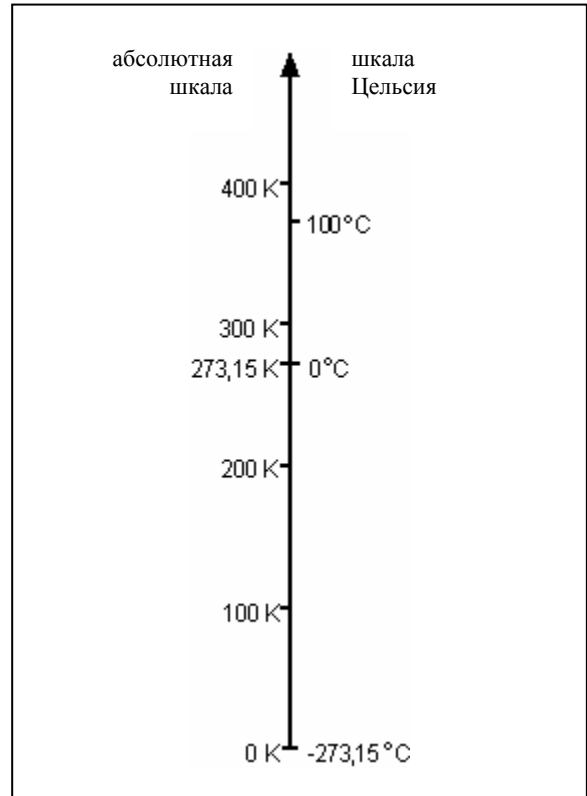


Рис. 10.10. Шкала температур Цельсия и абсолютная шкала температур

друг с другом. Заметь, что разность температур  $1^{\circ}\text{C}$  имеет такую же величину, как и разность температур  $1\text{K}$ .

Температура кипения воды по шкале Цельсия равна

$$t = 100^{\circ}\text{C},$$

а по абсолютной шкале

$$T = 373,15 \text{ K}.$$

**Нулевая точка абсолютной шкалы температур совпадает с  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Единицей измерения абсолютной температуры является кельвин.**

На рис. 10.11 изображена связь содержания энтропии и температуры для куска меди массой 100 г.

#### Задачи

1. Пересчитайте приведенные температуры по шкале Цельсия в абсолютные температуры:

|                            |                                 |
|----------------------------|---------------------------------|
| $0^{\circ}\text{C}$        | (температура плавления льда)    |
| $25^{\circ}\text{C}$ ,     | (нормальная температура)        |
| $100^{\circ}\text{C}$ ,    | (температура кипения воды)      |
| $183^{\circ}\text{C}$      | (температура кипения кислорода) |
| $-195,8^{\circ}\text{C}$ , | (температура кипения азота)     |
| $-268,9^{\circ}\text{C}$ , | (температура кипения гелия)     |
| $-273,15^{\circ}\text{C}$  | (абсолютная нулевая точка)      |



Рис. 10.12. Энтропия производится в пламени.

- Пересчитайте следующие абсолютные температуры в температуры по шкале Цельсия:
  - 13,95 К (температура плавления водорода)
  - 20,35 К (температура кипения водорода)
  - 54,35 К (температура плавления кислорода)
  - 61,15 К (температура плавления азота).
- Сколько энтропии содержит 1 г меди при 20°C? Для ответа на вопрос используйте рис. 10.11.

## 10.5 Производство энтропии

Чтобы согреть некоторое помещение, следует использовать тепловой насос: надо перекачать энтропию, захваченную снаружи в дом. Фактически большинство отопительных устройств действуют иначе: сжигается некоторое горючее вещество, например, уголь, дерево или горючий газ. Сгорание представляет собой химическую реакцию, в которой горючее вещество и кислород превращаются в другие вещества, главным образом в окислы углерода и воду (газообразную). Откуда возникает энтропия, которая исходит при сгорании из пламени? До этого она содержалась как в горючем веществе, так и в кислороде, хотя оба вещества при этом были холодными. Очевидно, она появляется при сгорании. Энтропия производится в пламени (рис. 10.12).

Другим способом отопления помещений является электрическое отопление. По тонкой проволочке пропускается сильный ток. Проволочка при этом сильно нагревается. Энтропия в данном случае производится в проволочке (рис.10.13).

Многие электрические приборы действуют по этому принципу: электроплитка, утюг, кипятильник, калорифер, фен, лампа накаливания.

Ты знаешь еще третий способ производства энтропии: с помощью механического трения. Если по вертикальному шесту для лазанья

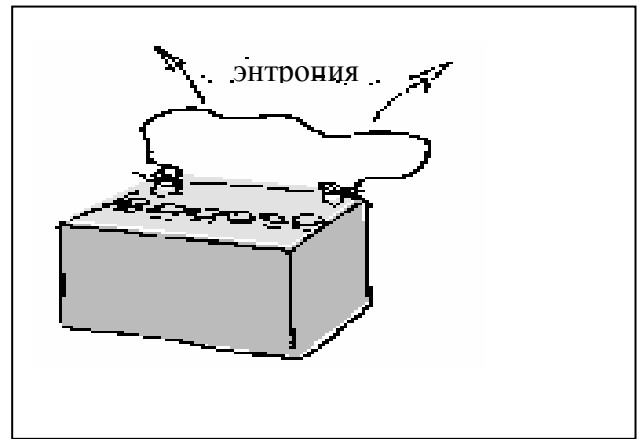


Рис. 10.13. По проволоке протекает электрический ток. При этом производится энтропия

сползть слишком быстро вниз, то возникновение энтропии ощущается весьма неприятным образом. Нагревание при трении особенно заметно, если сверлить тупым сверлом или пилить тупой пилой. На соприкасающихся поверхностях трущихся тел производится энтропия.

Во всех этих процессах энтропия действительно возникает вновь, она ниоткуда не доставляется, ниоткуда не переносится.

### Энтропия производится

- при химической реакции (например, сгорании);
- в проволочке, по которой протекает электрический ток;
- при механическом трении.

Впрочем, все эти процессы можно воспринимать как своего рода трение. Всегда при протекании чего-либо через соединение или проводящую систему, которые создают соответствующему потоку сопротивление, происходит "трение".

При механическом трении импульс течет из одного тела в другое через поверхность соприкосновения тел, которая плохо проводит импульс. В электрических нагревателях ток течет по проволоке, которая оказывает сопротивление для этого тока. И при химических реакциях преодолевается род трения – сопротивления, т.н. сопротивление реакции.

Мы обсудили вопрос о том, откуда берется энтропия, чтобы нагреть некоторое помещение или тело. Теперь займемся противоположной проблемой: как охладить некоторое тело. Один метод нам уже известен. Энтропию можно

выкачивать из некоторого тела с помощью теплового насоса.

Другой метод действует тогда, когда тело теплее окружающей среды (если его температура выше). Что надо сделать, если чай слишком горячий? Просто ждут. Энтропия вытекает из чашки и передается окружающим предметам.

В обоих случаях, т.е. с тепловым насосом и без теплового насоса, энтропия, которая оставляет охлаждаемое тело, вновь появляется в другом месте. Нельзя ли каким – то образом сделать так, чтобы энтропия в конце концов совсем пропала? Может ли она исчезнуть без появления где-то? Можно ли ее уничтожить? Наконец, ранее мы видели, что ее можно производить из ничего.

Многие изобретатели и естествоиспытатели пытались этого добиться, но безуспешно. Теперь мы твердо убеждены, что энтропию нельзя уничтожить.

Энтропию можно производить, но нельзя уничтожить.

Здесь уместно вспомнить о двух других величинах: энергии и импульсе. Эти величины можно не только произвести, но и уничтожить, что всегда предполагается для нас само собой разумеющимся. Если в некотором месте количество энергии прибывает, то в другом месте оно должно уменьшаться, и если где-либо уменьшается, то в другом должно прирасти. Сказанное относится также к импульсу.

Энергия может быть не только произведена, но и уничтожена. Импульс может быть не только произведен, но и уничтожен. Производимость энтропии выдвигает интересные вопросы и имеет удивительные следствия.

Первая проблема состоит в том, что энтропия может вновь возникать и действительно возникает вновь в бесчисленных процессах, протекающих на Земле. Особенно обильным источником энтропии является горение. Подумай о том, что горение происходит не только в печах, отопительных котлах и автомобильных моторах, но и еще в большей мере в природе: во всех живых существах, от микробов до млекопитающих, постоянно протекает окисление, т.е. процессы сгорания, и

при этом производится энтропия. Не должно ли при таких условиях количество энтропии на Земле становиться постоянно больше, не должно ли на Земле постоянно становиться теплее? Фактически температура Земли, отвлекаясь от малых колебаний ее, на протяжении миллионов лет остается постоянной. Объяснение: недостаточно рассматривать только и единственно Землю. Во-первых, Земля получает постоянно энтропию вместе со светом от Солнца. (И здесь энтропия перетекает от высоких к низким температурам: температура поверхности Солнца равна приблизительно 6000 К, а температура поверхности Земли составляет приблизительно 300 К.) Во-вторых, Земля постоянно отдает энтропию в мировое пространство. (Опять переходит энтропия от высоких температур к низким: мировое пространство имеет температуру около 3 К.) Отдаваемая Землей энтропия также переносится светом, правда, невидимым инфракрасным светом. Этот инфракрасный свет уносит прочь ровно столько энтропии, чтобы температура на Земле оставалась приблизительно постоянной. Остается, однако, вопрос, что же происходит со всем мировым пространством, так как его энтропия постоянно возрастает. На этот вопрос до сих пор нет ответа. Он представляет собой небольшую проблему в сравнении с другими неразрешенными вопросами о структуре и развитии Вселенной.

То, что энтропию можно производить, но нельзя уничтожить, имеет еще и другие удивительные следствия. Пусть кто-то показывает кинофильм без звука и при этом не уточняет как прокручивает его: от начала к концу или от конца к началу. Сможешь ли ты узнать в каком направлении фильм запущен? "Фильм" на рис. 10.14, если его правильно прокручивать, показывает горящую свечу. Если его неправильно показывать, то он будет демонстрировать то, чего нет в действительности: свечу, которая сама по себе увеличивается. Таким образом, в фильме изображается необратимый процесс. Почему этот процесс является необратимым? Потому что при его протекании производится энтропия. Его обратимость означала бы возможность уничтожения энтропии, а это не имеет места.



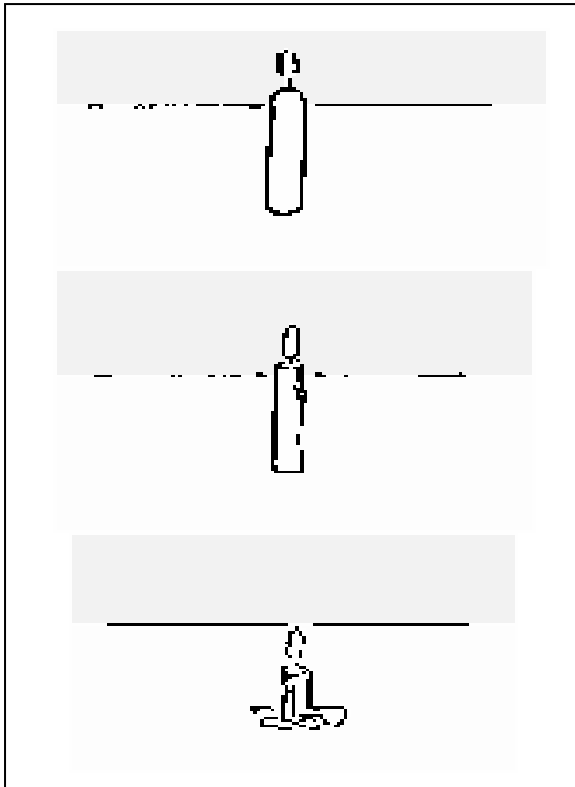


Рис. 10.14. Сгорание свечи является необратимым процессом

Другой необратимый процесс приводится в последовательности кадров на рис. 10.15: человек скользит вниз по шесту для лазания. И данный процесс не является обратимым, поскольку сопровождается производством энтропии.

Существуют процессы, которые могут протекать как в одном направлении, так и в обратном направлении: это все процессы, при которых нет производства энтропии. На рис. 10.16 показан пролетающий за окном мяч. Пролетает ли мяч слева направо как это показано в фильме? Или фильм прокручивают неправильно, а мяч на самом деле пролетает справа налево?

Процессы, в которых производится энтропия, являются необратимыми.

#### Задачи

1. Электрическая лампочка присоединена к батарее. Лампочка светится, а батарея постепенно садится. Опиши для этого случая обратный процесс. (Предположи при этом, что вовсе не запрещено, что энтропия уничтожается.)

2. Опиши детально, что произойдет, если процесс "едуший автомобиль" будет протекать в обратном направлении и при этом не будет запрещено уничтожение энтропии.

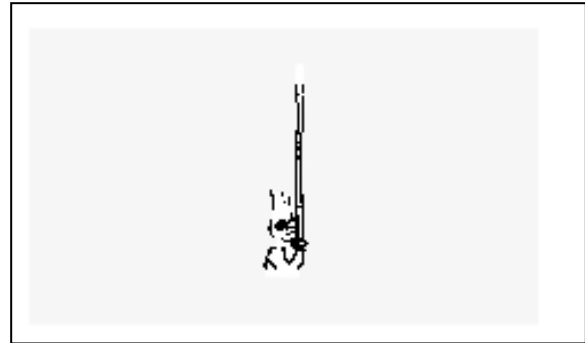


Рис. 10.15. Правильно ли расположены рисунки в этом ряду?

3. Велосипедист тормозит. Что будет происходить, если процесс станет развиваться в обратном направлении? (Допусти, что энтропия может уничтожаться.)

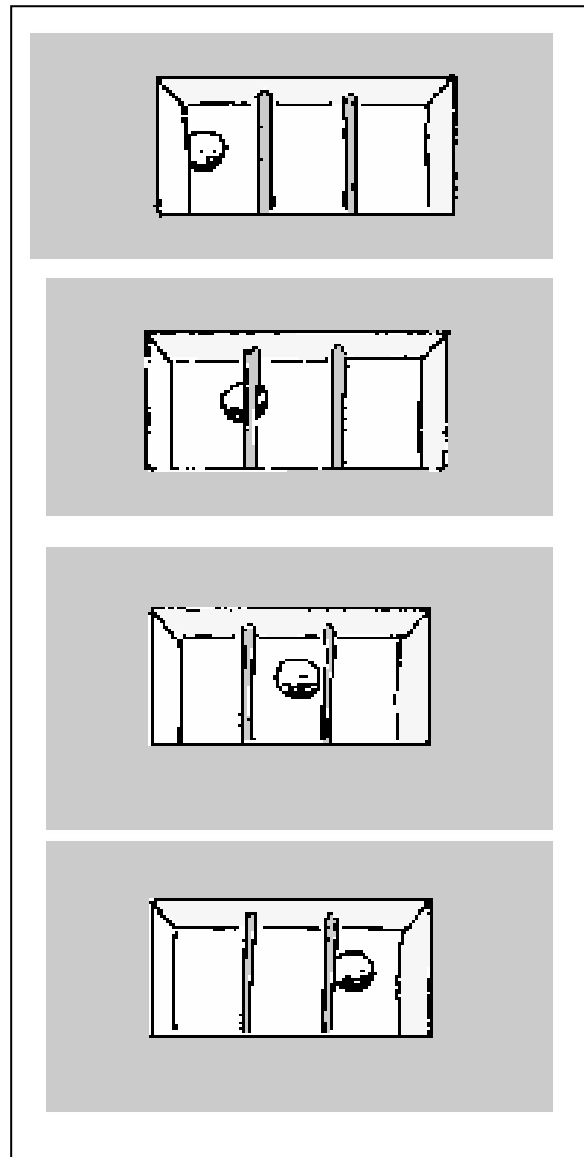


Рис. 10.16. Перелет мяча за открытым окном представляет собой обратимый процесс

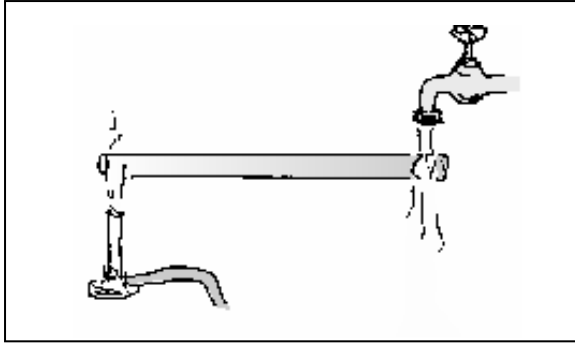


Рис. 10.17. От горячего конца стержня к холодному течет ток энтропии

## 10.6 Сила тока энтропии

Левый конец металлического стержня на рис. 10.17 подогревается, а правый охлаждается. Другими словами: слева к стержню подводится энтропия, а справа забирается. В стержне движется поток энтропии слева направо, от высокой температуры к низкой. Скажем, что течет ток энтропии. Число Карно, протекающих за секунду через стержень, дает нам силу тока энтропии:

$$\text{сила тока энтропии} = \frac{\text{энтропия}}{\text{промежуток времени}}$$

Для силы тока энтропии будем использовать символ  $I_s$ . Тогда можно написать:

$$I_s = \frac{S}{t}.$$

Единицей измерения силы тока энтропии является Карно в секунду, сокращенно  $St/c$ . От чего зависит сила тока энтропии между телами А и В? Взглянем на рис. 10.18. В верхнем положении разность температур между телами А и В больше, чем в нижнем положении. В остальном внизу и наверху все одинаково. Поскольку наверху стимул для потока энтропии больше, чем внизу, то и сила тока

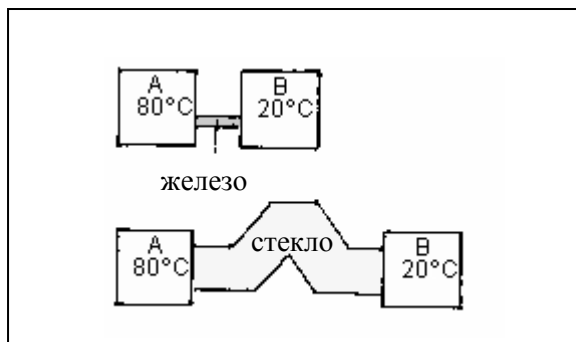


Рис. 10.19. Соединения с различными тепловыми сопротивлениями.

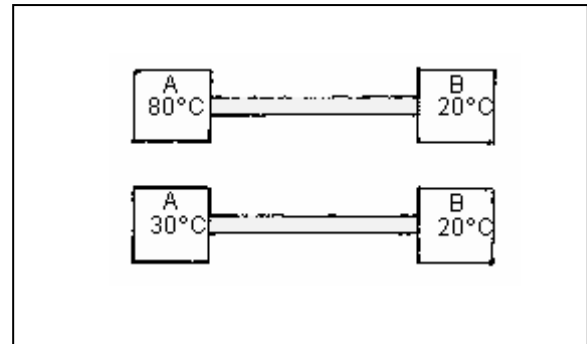


Рис. 10.18. Различие температур тел А и В для верхнего случая больше, чем для нижнего

энтропии там больше.

Чем больше разность температур между двумя местами (т.е. больше стимул), тем сильнее поток энтропии, текущий от одного места к другому.

## 10.7 Тепловое сопротивление

Величина силы тока энтропии для одной и той же разности температур может быть различной. Она зависит не только от разности температур, но и от способа соединения, от теплового сопротивления соединения (см. рис. 10.19). От чего же зависит тепловое сопротивление некоторого соединения?

На рис. 10.20 изображены два проводника энтропии а и б, соединяющие тела с одинаковой разностью температур равной 60 К. Поперечное сечение проводника б. в два раза больше, чем у проводника а. Поэтому по половине проводника б (верхней или нижней) течет столько же энтропии, сколько и по проводнику а. По обеим же половинам б одновременно протекает в два раза больше, чем в проводнике а.

На рис. 10.21 опять изображены два проводника а и б. Здесь проводник б в два раза длиннее, чем проводник а. Сравним одну из

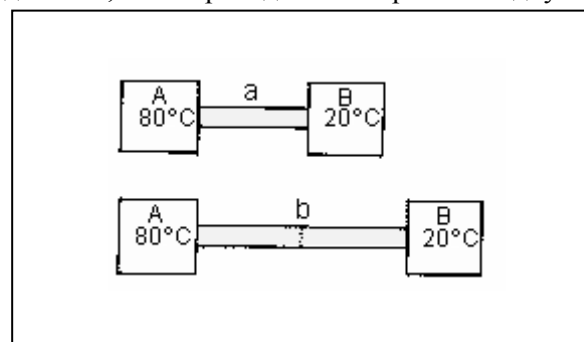


Рис. 10.20. Через более толстое соединение течет более сильный поток энтропии

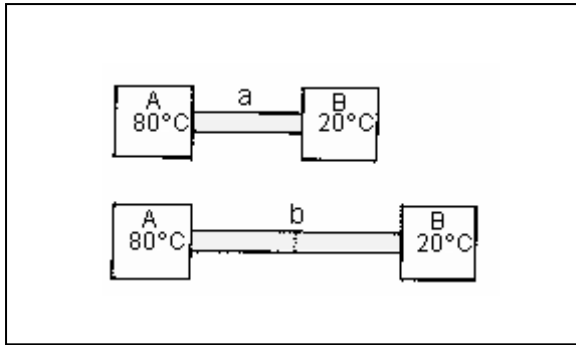


Рис. 10.21. Через более короткое соединение течет более сильный поток энтропии

половин  $b$ , например, левую, с проводником  $a$ . Оба совершенно одинаковы, но на концах  $a$  приложена большая разность температур, чем на половине проводника  $b$ . Поэтому через этот кусок  $b$  протекает более слабый поток энтропии, чем через  $a$ . По второму куску  $b$  также протекает более слабый поток энтропии.

На рис. 10.22, наконец, показаны два проводника, у которых одинаковая длина и одинаковое поперечное сечение. Кроме того, между концами этих проводников приложена одинаковая разность температур. Тем не менее, через  $b$  протекает меньший поток энтропии, чем через  $a$ , поскольку сделан из дерева, а проводник  $a$  - из меди.

Каждый проводник оказывает протекающему по нему потоку энтропии некоторое сопротивление. Это тепловое сопротивление тем больше, чем меньше поперечное сечение проводника и чем больше длина проводника. Оно зависит также от материала проводника.

На рис. 10.23 еще раз дается взаимосвязь силы тока энтропии и теплового сопротивления.

Исследуем некоторые материалы с тем, чтобы выяснить имеют ли они ничтожное или очень большое тепловое сопротивление, являются ли

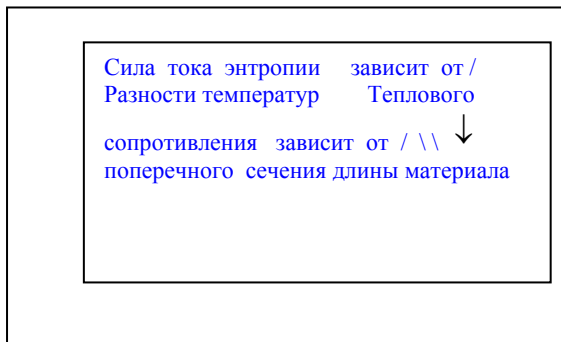


Рис. 10.23. Связь между силой тока, разностью температур и свойствами соединения

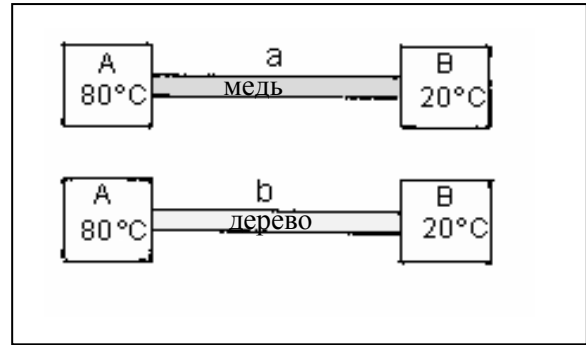


Рис. 10.22. Через соединение из меди течет более сильный поток энтропии, чем через деревянное соединение .

они хорошими или плохими проводниками тепла. Возьмем маленький стержень двумя пальцами за один конец, а другой поместим в пламя как это показано на рис. 10.24. В зависимости от теплового сопротивления материала мы ощутим пальцами достаточно быстро или, наоборот, медленно, что он становится горячим.

Мы устанавливаем, что дерево, стекло и пластмасса имеют действительно высокое тепловое сопротивление. Металлы, наоборот, имеют незначительное тепловое сопротивление, и они хорошо проводят тепло. Воздух и другие газы обладают очень высоким тепловым сопротивлением. Поэтому для тепловой изоляции зданий используются материалы, которые содержат много воздуха: кирпичи с пустотами, газовый бетон, пористые синтетические материалы и волокнистые прокладочные материалы. По сходной причине шерстяной джемпер хорошо сохраняет тепло, т.к. шерсть содержит много промежутков, заполненных воздухом.

Можно также объяснить, почему металлический предмет ощущается более холодным, чем деревянный.

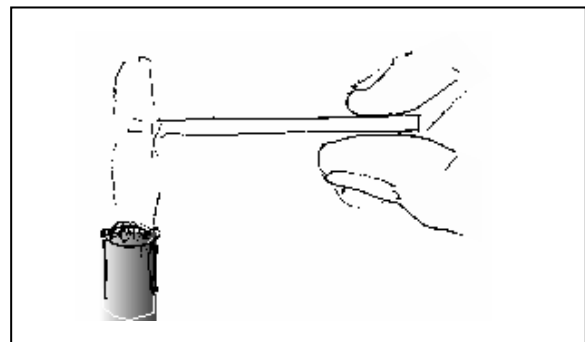


Рис. 10.24. В зависимости от теплового сопротивления стерженька его правый конец нагревается более быстро или менее быстро

Прежде всего, установим, что это наблюдение имеет место для низких температур. Поместим кусок металла и кусок дерева в кипящую воду, в результате чего они нагреются до температуры  $100^\circ\text{C}$ . Если их вынуть из воды и потрогать пальцами, то металлический кусок покажется горячее, чем деревянный. Как это можно объяснить?

При прикосновении к куску дерева и к куску металла, охлажденными до температуры  $10^\circ\text{C}$ , пальцами, имеющими температуру  $25^\circ\text{C}$ , вначале происходит отток энтропии из пальцев в вещество одного из кусков (рис. 10.25). Дерево в месте прикосновения быстро становится теплым, принимая температуру пальца, т.к. не может полученную энтропию предавать дальше. В металле, напротив, энтропия уходит от места соприкосновения в глубь куска и место это нагревается очень слабо.

У плохо проводящих тепло тел пальцы ощущают не температуру тела, которую оно имело перед соприкосновением, а температуру, которую оно приобрело в результате соприкосновения.

### Задачи

2. Как надо построить дом, чтобы тепловые потери (потери энтропии) были по возможности наименьшими?
3. Батарея центрального отопления должна максимально легко передавать наружу энтропию текущей в ней горячей воды. С помощью каких приемов этого можно достичь? Назови другие устройства, в которых требуется хорошая проводимость тепла.

## 10.8 Перенос энтропии с помощью конвекции

Разница температур является причиной для потока энтропии. Если необходимо перенести энтропию из места А в другое место В следует позаботиться о том, чтобы в А температура была бы выше, чем в В. Такой способ

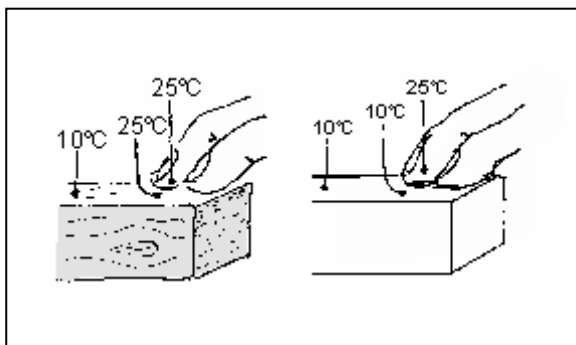


Рис. 10.25. До прикосновения оба тела имели одинаковую температуру, а после разную

транспортирования энтропии называется теплопроводностью. Это, так сказать, нормальный способ переноса энтропии из точки А в точку В.

Тщательнее наблюдая окружающий мир, можно заметить, что во многих случаях транспорт энтропии и в особенности ее перенос на большие расстояния невозможен за счет теплопроводности. Разумеется, существует еще один способ передачи энтропии, а именно конвекционный способ переноса энтропии или конвекция.

Нагревают жидкость или газ и переправляют их из одного места А в другое место В с помощью, например, насоса. Энтропия при этом захватывается веществом и переносится. Здесь не требуется разности температур, чтобы вызвать поток энтропии, но необходимо организовать поток жидкости или газа.

Например, конвекционный перенос энтропии осуществляется при центральном отоплении (рис.10.26). В отопительном котле, находящемся чаще всего в подвале дома, вода нагревается, например, в результате сжигания мазута. Горячая вода по трубам гонится насосом к отопительным батареям в разных помещениях. В батареях вода отдает часть энтропии и затем возвращается по трубам в отопительный котел.

Перенос энтропии легче осуществить с помощью конвекции, чем с помощью теплопроводности при наличии разности температур. Причиной этого является отсутствие действительно хороших проводников тепла. Даже такой относительно хороший проводник тепла как медь в своей основе все же является очень плохим проводником тепла. Например, невозможно передавать энтропию из котельной центрального отопления с помощью медных шин в различные помещения некоторого здания. С другой стороны, перенос на большие

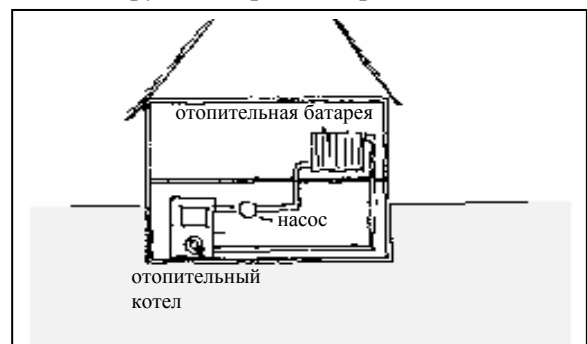


Рис. 10.26. Центральное отопление. Энтропия передается конвективно от отопительного котла к батареям отопления



Рис.10.27. В помещении энтропия перераспределяется с помощью конвекции

расстояния воды или воздуха вместе с энтропией не составляет никакой проблемы.

Конвективный перенос энтропии: энтропия захватывается текущей жидкостью или текущим газом. Для конвективного переноса энтропии не требуется разности температур.

В природе и технике имеется много примеров конвективных потоков энтропии.

В отапливаемой комнате энтропия должна от отопительной батареи или печи распространиться по всему помещению. Как это возможно? Воздух все же является плохим проводником тепла. Энтропия конвективно переносится вместе с воздухом. Здесь, впрочем, воздух движется без помощи насоса. От отопительной батареи или печи воздух поднимается вверх, т.к. у теплого воздуха плотность меньше, чем у холодного (рис. 10.27).

Двигатель каждого автомобиля необходимо охлаждать, т.е. отводить от него энтропию (рис. 10.28). Некоторые двигатели имеют водяное охлаждение: энтропия переносится, как и в случае центрального отопления от двигателя к холодильнику. Для прогонки воды используется насос охлаждаемой воды. В холодильнике энтропия отдается протекающему через него воздуху.

Также все гигантские переносы энтропии в природе, определяющие погоду на планете, являются конвективными. В атмосфере энтропия переносится на очень большие расстояния ветром, т.е. перемещающимся воздухом.

Очень интересный пример конвективного переноса энтропии представляет собой Гольфстрим. Он переносит энтропию от Карибского моря к Европе (рис. 10.29). Это приводит к тому, что климат в Европе является

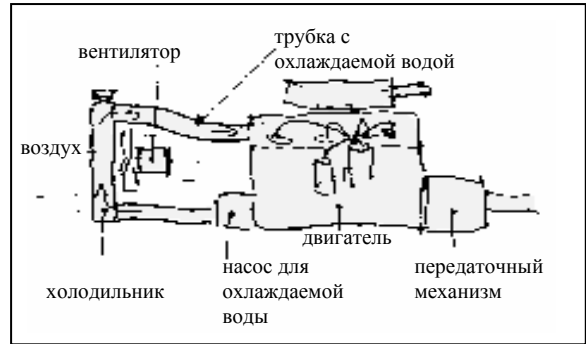


Рис. 10.28. Охлаждение автомобильного двигателя. Энтропия конвективно переходит от двигателя к холодильнику

умеренным, т.е. не такой каким должен быть для данной географической широты.

Рассмотрим перенос энтропии, сопоставляя при этом теплопроводность и конвекцию по пути следования энтропии в центральном отоплении дома. В отопительном котле возникшая в пламени энтропия конвективным путем передается наружной стороне стенки котла с водой. Внутри стенки она распространяется обычным образом, т.е. под действием разности температур. Потом она захватывается водой и конвективным путем переносится к отопительным батареям. Через стенку батареи она проходит обычным способом. От внешней поверхности батареи, наконец, энтропия конвективно с потоком воздуха попадает в разные места комнаты. Видно, что на длинном пути от пламени в отопительном котле и до отапливаемой комнаты только маленькие участки, измеряемые миллиметрами, энтропия преодолевает в результате обычной теплопроводности. Перенос энтропии на большие расстояния совершается конвективным путем.

### Задачи

1. Опиши, каким путем в доме теряется тепло. Какие потери связаны с теплопроводностью и какие с

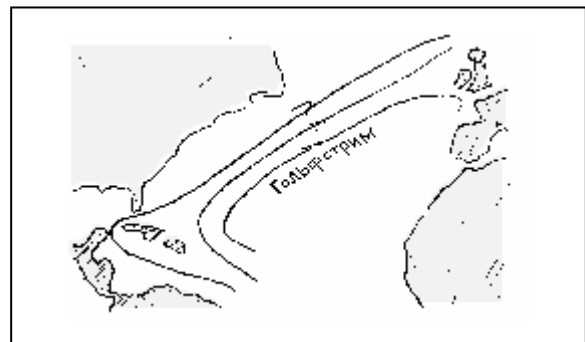


Рис. 10.29. Гольфстрим. Энтропия переносится морским течением от Карибского моря к Европе

конвекцией?

2. Опиши путь энтропии из двигателя автомобиля в окружающий воздух. На каких отрезках пути энтропия течет за счет разности температур и на каких течет за счет конвекции.

3. Как действует отопление в автомобиле? Опиши путь энтропии в этом случае.