

# 11. Энтропия и энергия

## 11.1 Энтропия как носитель энергии

Мы хотим определить энергетический баланс для электрических отопительных и нагревательных приборов. Под электрическим или нагревательным прибором подразумевается не что иное, как простой электрический провод, по которому протекает электрический ток и который, вследствие этого, нагревается. Такой процесс нагревания, как известно, имеет множество применений: электроплитки, электроутюги, электрические лампочки накаливания...

Мы знаем, что, с одной стороны, в нагревательном приборе создается энтропия, причем во время работы прибор отдает свою энтропию. С другой стороны, нам известно, что электронагреватель вынужден «расходовать» энергию, то есть энергия через соединительный кабель утекает из сети в электрический прибор. Следовательно, носителем утекающей в электронагреватель энергии является электричество.

Теперь необходимо, чтобы эта энергия, которая постоянно посредством электричества утекает в электрический прибор, вытекала бы из него. Поэтому мы ставим вопрос: Что является носителем этой энергии?

Ответ на этот вопрос весьма прост. Наряду с энергией из прибора вытекает также и энтропия, которая и является искомым носителем этой энергии. Мы можем это утверждение обобщить: Поток энтропии всегда сопровождается потоком энергии.

**Энтропия является носителем энергии.**

Электронагреватель принадлежит к приборам, которые мы ранее называли переагрузчиками энергии. Энергия с помощью носителя - электричества утекает в прибор. В приборе создается энтропия и энергия покидает прибор с этой созданной энтропией. То есть энергия переагружается от электричества на энтропию. На рис. 11.1 схематически показан такой прибор.

(Рис. 11.1. Диаграмма потоков энергии. (энергия; электронагреватель; энергия; электрический ток; энтропия))

(Рис. 11. 2. Полная диаграмма потоков энергии. (энергия; электронагреватель; энергия; электрический ток; энтропия))

В одном месте эта диаграмма потоков не закончена. Носитель утекающей энергии, то есть электричество, должен из прибора снова вытекать, так как электричество здесь не может ни создаваться, ни исчезать. Из рис. 11.2 видно, что кроме входа для электричества имеется также и его выход. Учти, что энергия и электричество имеют как вход, так и выход, в то время как энтропия имеет только выход. Это можно сформулировать также следующим образом: В электронагревателе энергия переагружается на вновь созданную энтропию.

Результаты этих соображений могут быть перенесены и на другие процессы, в которых создается энтропия. На рис. 11.3 представлена диаграмма потоков печи, работающей на жидком топливе. В эту печь утекает энергия посредством носителя «жидкое топливо + кислород». В процессе создания тепла жидкое топливо и кислород превращаются в выхлопной газ, содержащий водяной пар и углекислый газ. При сгорании создается энтропия и энергия покидает печь с этой энтропией.

(Рис.11.3. Диаграмма потоков энергии печи на жидком топливе. (энергия; печь на жидком топливе; энергия; жидкое топливо + кислород; выхлопные газы; энтропия))

(Рис. 11.4. К заданию 1. На нижней поверхности ящика создается энтропия.)

### Задания

1. Начерти диаграмму потоков энергии для процесса трения, который представлен на рис. 11.4. Указание: «перезагрузчиком энергии» здесь является нижняя, трущаяся поверхность ящика.

2. Башня из строительных кубиков рушится. В какой части этого процесса создается энтропия? Откуда берется необходимая для этого энергия?

## 11.2 Связь между потоком энергии и потоком энтропии

Каждый поток энтропии сопровождается потоком энергии. В какой связи друг с другом находятся эти два потока? Частичный ответ на этот вопрос дать довольно легко: Сила потока энтропии должна быть как-то связана с силой потока энергии. Можно сказать еще более точно: Два одинаковых по силе потока энтропии несут вдвое больше энергии, чем один из них. Математически это положение выражается следующим образом:

$$P \sim I_S \quad (1)$$

Это соотношение между  $P$  и  $I_S$ , не является законченным. Для того чтобы определить отсутствующую часть этого выражения, обратимся снова к энергетическому балансу, но не для электронагревателя, а для

электрического теплового насоса, который лучше подходит для понимания этой проблемы.

(Рис. 11.5. Диаграмма потоков энергии для теплового насоса.(энергия; тепловой насос; энергия; электрический ток; энтропия))

На рис. 11.5 представлена диаграмма потоков этого перезагрузчика энергии. В этом случае для каждого вытекающего потока существует такой же силы втекающий поток, в том числе и для потока энтропии. Энергия снова вводится в устройство носителем – электричеством. Электричество покидает тепловой насос после того, как оно отдало свою энергию. С другой стороны, в тепловой насос втекает энтропия, на которую и перезагружается пришедшая с электричеством энергия. Эта энергия покидает насос вместе с вытекающей из него энтропией.

Рассмотрим более внимательно правую часть диаграммы потоков. Правая стрелка энергии представляет собой энергию, которая была получена от электричества. Правую часть этой диаграммы можно еще точнее представить так, как это показано на рис. 11.6. Здесь видно, что втекающая в тепловой насос энтропия также несет энергию. При этом вытекающая энтропия несет больше энергии по сравнению с втекающей энтропией, то есть существует дополнительная добавка энергии к энергии, полученной от электричества. Следовательно, на рис. 11.5 представлены только так называемые «чистые» потоки энергии.

(Рис. 11.6. Тепловой насос. Здесь подробно представлены потоки энергии, которые текут с энтропией. (энергия; тепловой насос; энергия; электрический ток; энергия; энтропия))

Из рис. 11.6 видно, что два потока энтропии одинаковой силы могут переносить различные количества энергии. Втекающий поток энтропии переносит меньше энергии, а вытекающий поток больше энергии. Следовательно, силы потоков энергии зависят и еще от чего-то другого, а не только от силы потоков энтропии.

В чем отличие энтропии на входе от энтропии на выходе устройства? Оказывается, что от температуры. Сила потока энергии должна, кроме того, зависеть от температуры соединительной линии, по которой течет энтропия. Мы можем утверждать, что коэффициент пропорциональности, который приводит выражение (1) в равенство, зависит от температуры.

Заметим, что искомый коэффициент пропорциональности представляет собой не что иное, как абсолютную температуру:

$$P = T * I_S. \quad (2)$$

Не случайность ли это? Совершенно нет. Температурная шкала, которой пользуется каждый из нас и с которой мы все уже давно имеем дело, как раз и определяется на основании выражения (2).

**Поток энтропии силой  $I_S$  несет поток энергии силой  $T * I_S$ .**

Уравнение (2) показывает, что температуру можно интерпретировать следующим образом:

**Температура указывает, насколько сильно поток энтропии загружен энергией.**

Теперь мы можем установить точный количественный энергетический баланс теплового насоса. Назовем высокую температуру, с которой энтропия выходит из машины,  $T_A$ , а низкую температуру, с которой энтропия входит

в машину,  $T_B$ . Втекающей энтропии с низкой температурой соответствует, следовательно, поток энергии силой

$$P_B = T_B * I_S$$

На выходе машины (при более высокой температуре) вытекает поток энергии силой

$$P_A = T_A * I_S.$$

Следовательно, сила чистого потока энергии равна

$$P = P_A - P_B = T_A * I_S - T_B * I_S.$$

Таким образом

$$P = (T_A - T_B) I_S. \quad (3)$$

Этот чистый поток энергии должен быть точно такой же силы, как и поток энергии, который через сетевой кабель втекает в тепловой насос. Уравнение (3) определяет также и потребление энергии тепловым насосом. Мы интерпретируем уравнение (3) следующим образом:

**Тепловой насос потребляет тем больше энергии,**

**- чем больше энтропии он должен поставлять**

**- и чем выше разность температур, которую насос преодолел.**

*Пример:* Тепловой насос, который нагревает помещение, поставляет снаружи внутрь дома 30 Карно в секунду. Температура вне помещения составляет 10 °C, а внутри 22 °C. Сколько энергии потребляет насос?

Заметим, что в данном случае мы не нуждаемся в переводе температур в абсолютную шкалу, так как нас интересует только разность температур, а эта разность не зависит от того,

измеряем ли мы температуру по шкале Цельсия или по шкале Кельвина. Следовательно,  $T_A - T_B = 12$  К. Из этого получаем

$$P = (T_A - T_B)I_S = 12 \text{ К} * 30 \text{ Карно/с} \\ = 360 \text{ Вт.}$$

Теперь мы рассмотрим случай, когда тот же самый дом обогревается обычным электрическим отоплением, то есть энтропия не приходит извне, а создается в самом доме. Естественно, что мы хотим поддерживать в доме ту же температуру, то есть  $22^\circ\text{C}$ , и получить те же необходимые  $30$  Карно/с, так как дом через стены потеряет столько же тепла, как и ранее. Силу потока энергии, которая выходит из электронагревателя, мы подсчитаем с помощью уравнения (2), причем в этом случае  $T = (273 + 22) \text{ К} = 295 \text{ К}$  и  $I_S = 30$  Карно/с:

$$P = T * I_S = 295 \text{ К} * 30 \text{ Карно/с} \\ = 8850 \text{ Вт.}$$

Таким образом, потребление энергии для обычного электронагревателя по нашему расчету значительно выше потребления энергии при обогреве тепловым насосом. Практически разумеется эта разница не так велика, так как и в каждом тепловом насосе создается какое-то количество энтропии.

### Задания

1. В доме, который обогревается с помощью нагревателя на жидком топливе, необходимо поддерживать температуру  $20^\circ\text{C}$ . Потери тепла в доме составляют  $35$  Карно/с. Каково потребление энергии этого нагревателя?

2. Устройство охлаждения автомобиля, температура двигателя которого

составляет  $90^\circ\text{C}$ , отдает в атмосферу  $60$  Карно в секунду. Каков поток энергии, который вытекает из устройства охлаждения автомобиля в окружающий воздух?

3. Температура на нижней поверхности электрического утюга, мощность которого равна  $1000$  Вт, составляет  $300^\circ\text{C}$ . Сколько энтропии вытекает в секунду из утюга?

4. Плавательный бассейн обогревается тепловым насосом. Тепловой насос забирает энтропию из мимо протекающего ручья. Температура в ручье равна  $15^\circ\text{C}$ , а требуемая температура воды в плавательном бассейне  $25^\circ\text{C}$ . Вода в бассейне постоянно теряет энтропию, которая уходит в окружающую среду, а ее величина составляет  $500$  Карно в секунду. Для поддержания заданной в бассейне температуры тепловой насос должен постоянно дополнительно поставлять необходимую энтропию. Сколько энергии потребляет тепловой насос?

5. (а) Дом отапливается тепловым насосом. Температура вне дома составляет  $0^\circ\text{C}$ , а температура в доме  $25^\circ\text{C}$ . Тепловой насос поставляет  $30$  Карно/с. Сколько энергии потребляет тепловой насос?

(б) Тот же самый дом отапливается обычным электронагревателем, то есть поток энтропии, равный  $30$  Карно/с, создается в доме. Каково потребление энергии?

### 11.3 Создание энтропии потоком энтропии

Через стержень, который обладает высокой теплопроводностью, протекает энтропия, рис. 11.7. Этот поток поддерживается посредством разницы температур. Рассматриваемый стержень

имеет идеальную тепловую изоляцию: потери энтропии отсутствуют. В начале эксперимента температура в различных точках стержня меняется. По истечении некоторого времени изменения заканчиваются и устанавливается *равновесие потоков*.

Уравнение, которое связывает силу потоков энтропии и энергии, для этого простого эксперимента приобретает неожиданное содержание.

(Рис. 11.7. На правом конце стержня вытекает больше энтропии, чем в него втекает на левом конце. (стержень; изоляция))

Рассмотрим три различные точки стержня: правую, то есть холодный конец, среднюю и левую, то есть горячий конец. Значения величин в указанных трех точках мы будем обозначать «1», «2» и «3». Слева в стержень втекает поток энергии силой  $P_3$ . Так как равновесие потоков уже установилось, энергия нигде не скапливается и сила потока энергии должна в каждой точке стержня иметь одинаковую величину:

$$P_3 = P_2 = P_1 \quad (3)$$

Мы знаем, что сила потока энергии  $P$  связана с силой потока энтропии  $I_S$  следующим образом

$$P = T * I_S \quad (4)$$

Заменив силу потока энергии в равенстве (3) с помощью равенства (4), получим:

$$T_3 * I_{S3} = T_2 * I_{S2} = T_1 * I_{S1} \quad (5)$$

Мы знаем, что температура  $T_3$  больше чем  $T_2$ , а  $T_2$  больше чем  $T_1$ :

$$T_3 > T_2 > T_1$$

Чтобы (5) имело силу, необходимо, чтобы

$$I_{S3} < I_{S2} < I_{S1}.$$

Теперь становится ясным, что поток энтропии слева направо будет возрастать. Справа, у источника с холодной водой из стержня выходит больше энтропии, чем входит в стержень слева, у источника пламени. Следовательно, в стержне должна создаваться энтропия. Как это может быть?

Этот результат совершенно не удивителен, как это могло показаться с первого взгляда. Ранее мы установили, что энтропия создается, когда имеет место любой вид трения или когда электрический ток протекает через любое сопротивление. А здесь как раз и существует такой процесс. Здесь не течет ни жидкость, ни газ, ни импульс и нет электрического тока, а протекает только сама энтропия. При потоках энтропии через какое-либо сопротивление также происходит создание энтропия.

Энтропию на выходе стержня, то есть на его правом конце, мы можем мысленно разложить на две составляющие: первая, которая втекает слева, и вторая, которая возникает вновь на пути слева направо. Следовательно,

$$I_{S1} = I_{S3} + I_{S \text{ созданный}},$$

где  $I_{S \text{ созданный}}$  представляет собой создаваемое в стержне количество энтропии за секунду.

**Если энтропия течет через тепловое сопротивление, то создается дополнительная энтропия.**

*Пример:* Провод накаливания электрокипяильника мощностью 700 Вт, рис. 11.8, находится при

температуре 1000 К (727 °С). Сила потока энтропии, который вытекает из этого провода, равна

$$I_S = P/T = 700 \text{ Вт}/1000 \text{ К} = 0,7 \text{ Карно/с.}$$

(Рис. 11.8. Спираль электрокипятивника. Справа ее поперечное сечение (упрощенное и увеличенное). (металлическая оболочка; керамическая изоляция; провод накаливания))

Ясно, что на внешней поверхности спирали электрокипятивника температура равна температуре воды. Предположим, что температура воды равна 350 К (77 °С). Тогда, сила потока энтропии через поверхность спирали равна

$$I_S = P/T = 700 \text{ Вт}/350 \text{ К} = 2 \text{ Карно/с}$$

Следовательно, на коротком пути от провода накаливания до внешней поверхности спирали электрокипятивника создается  $(2 - 0,7)$  Карно/с = 1,3 Карно/с.

Благодаря электрическому току в проводе накаливания создается поток энтропии, равный 0,7 Карно/с, а благодаря выходящему наружу потоку энтропии будет создаваться больше энтропии, чем из-за электрического тока.

### Задания

1. Дом обогревается электронагревателем мощностью 20 кВт. Температура внутри дома 20 °С, а наружная температура составляет -5 °С.

(а) Какова сила текущего наружу потока энтропии на внутренней стене дома?

(б) Какова сила потока энтропии на внешней стене дома?

(с) Сколько новой энтропии в секунду создается при вытекании энтропии?

2. Провод накаливания электроплитки мощностью 1000 Вт имеет температуру 1000 К.

(а) Сколько энтропии в секунду создается в проводе накаливания?

(б) На электроплитке находится кастрюля с водой; температура воды составляет 373 К. Сколько энтропии в секунду поступает в воду?

(с) Сколько энтропии создается на пути от провода накаливания до воды?

### 11.4 Тепловые двигатели

То, чем является тепловой двигатель, лучше и проще всего можно объяснить по диаграмме потоков энергии, рис. 11.9. На этом рисунке представлен перезагрузчик энергии, который получает энергию от энтропии и отдает ее вновь с помощью импульса вращения. То, что носителем энергии на выходе машины является импульс вращения, означает, что энергия выходит на вращающийся вал, что и приводит машину в движение.

К классу тепловых двигателей принадлежат:

- паровые турбины
- поршневые двигатели
- двигатели внутреннего сгорания
- реактивные двигатели
- другие, менее распространенные машины.

Мы увидим в дальнейшем, как конкретно работают эти машины. Сейчас мы рассмотрим только действие

этих машин в общем виде. Для начала мы сделаем небольшое отступление от прямого анализа.

(Рис. 11.9. Диаграмма потоков энергии теплового двигателя. (энергия; тепловой двигатель; энергия; высокая температура; низкая температура; энтропия; импульс вращения))

На рис. 11.10 показана диаграмма потоков энергии водяной турбины, то есть устройства, которое не является тепловым двигателем. На водяную турбину поступает обладающая высокой силой давления вода, которая отдает турбине свою энергию, и «превращается» в воду с низкой силой давления. Израсходованная водой энергия идет от турбины на вал благодаря импульсу вращения, являющегося переносчиком этой энергии.

(Рис. 11.10. Диаграмма потоков энергии водяной турбины. (энергия; водяная турбина; энергия; высокая сила давления; низкая сила давления; вода; импульс вращения))

Сравнение рис. 11.10 с рис. 11.9 показывает, что тепловой двигатель и водяная турбина имеют существенное сходство. В тепловом двигателе энтропия вытекает с более высокой температурой, то есть с энтропией, несущей значительную энергию. Та же самая энтропия вытекает из машины при низкой температуре, то есть с более низкой энергией. В то время как энтропия «переходит» в машине с высокой на низкую температуру она отдает свою энергию, которая в свою очередь поступает на вращающийся вал посредством импульса вращения, являющегося переносчиком энергии.

**В тепловом двигателе происходит перезагрузка энергии от энтропии на импульс вращения.**

Подсчитаем теперь энергию, которую тепловой двигатель отдает за секунду. Машина принимает на входе энтропию с высокой температурой и, следовательно, поток энергии силой  $T_A I_S$  и отдает на выходе энтропию с низкой температурой и, следовательно, поток энергии силой  $T_B I_S$ . Разность этих потоков как раз и является силой потока той энергии, которая перезагружается на импульс вращения. С этим импульсом вращения уходит из машины и поток энергии силой

$$P = T_A I_S - T_B I_S = (T_A - T_B) I_S.$$

**Тепловой двигатель отдает с импульсом вращения тем больше энергии,**

**- чем больше сила потока энтропии, который течет через машину,**

**- чем выше перепад температур, который сопровождает в машине поток энтропии.**

На большинстве электростанций генератор приводится в движение посредством теплового двигателя. Диаграмма потоков двух таких взаимосвязанных машин представлена на рис. 11.11. Оба таких перезагрузчика энергии можно также представить символически в одном блоке, рис. 11.12. Сравни еще раз эту диаграмму потоков с диаграммой потоков электрического теплового насоса, которая представлена на рис. 11.13. (Она совершенно аналогична диаграмме потоков на рис. 11.5.) Эти диаграммы потоков различаются только направлением стрелок.

(Рис. 11.11. Диаграмма потоков энергии тепловой электростанции. (энергия; тепловой двигатель; энергия; генератор; энергия; энтропия; импульс вращения; электрический ток))

(Рис. 11.12. Диаграмма потоков энергии тепловой электростанции. Турбина и

генератор представлены здесь одним блоком. (энергия; тепловая электростанция; энергия; энтропия; электрический ток))

(Рис. 11.13. Диаграмма потоков энергии теплового насоса (энергия; тепловой насос; энергия; электрический ток; энтропия))

Тепловая электростанция работает точно также, как и тепловой насос, но только в противоположном направлении. В то время как энергия в тепловом насосе перезагружается от электричества на энтропию, энергия в электростанции (рис. 11.12) перезагружается от энтропии на электричество.

Тепловая электростанция, перезагружающая энергию от энтропии на электричество, является сложным и очень большим сооружением. Однако, существуют устройства, которые делают тоже самое, а именно перезагружают энергию от энтропии на электричество, но очень малы, портативны и одновременно прочны. Они называются *элементами Пельтье*.

Элементы Пельтье могут также выполнять и противоположные функции, например, работать как тепловой насос. Такой элемент является одновременно не слишком сложным, не очень дорогим и очень компактным тепловым насосом.

Однако, к сожалению элементы Пельтье имеют высокие потери энергии. Они пригодны в таких приложениях, для которых эти потери не играют большой роли.

## 11.5 Источники энтропии для тепловых двигателей

Если мы хотим использовать тепловой двигатель, то перед нами возникают две проблемы:

- 1) Необходимо использовать источник энтропии при высокой температуре.
- 2) Необходима возможность снова избавиться от энтропии с низкой температурой, так сказать избавиться от «мусорной свалки для энтропии».

Эти проблемы могут быть решены различными способами.

### *Естественные источники энтропии*

Решение, которое меньше всего вредит нашей окружающей среде, заключается в следующем: использовать естественные источники энтропии при высокой температуре.

На земле существуют места, где в пластах горных пород на не очень большой глубине находится горячий пар. В таких местах можно пробурить отверстия в поверхности земли и использовать этот горячий пар для электрических станций. К сожалению такие месторождения *геотермической* энергии встречаются редко.

Другая возможность: посредством солнечного света земля получает огромное количество энтропии при высокой температуре. Эта энтропия уже используется в некоторых *солнечных электростанциях*. Хотя этот источник энтропии почти неисчерпаем, его использование представляет собой ряд трудно решаемых проблем. Во-первых, солнечный свет распределяется на слишком большую поверхность, поэтому энтропия и приходящая с ней энергия в значительной степени разжижена, а это приводит к необходимости «собирать» ее с очень больших освещаемых солнцем площадей. Сбор энергии можно

реализовать с помощью зеркал, концентрирующих свет на паровом котле. Вторая проблема заключается в том, что солнечный свет далеко не всегда приходит на землю, например, в зимнюю пору, когда необходимость в энергии наибольшая, а солнце светит мало и слабо.

### *Искусственные источники энтропии*

Гораздо большая часть энтропии, которая сегодня используется для приведения в действие тепловых двигателей, создается менее элегантно способом: она производится сжиганием горючих материалов или посредством ядерных реакций.

Так как тепловые двигатели используются в очень больших масштабах, то серьезную проблему представляет собой не только производство энтропии, но и «термические отходы». Посмотрим, как эти проблемы решаются для важнейших тепловых двигателей.

#### Тепловые электростанции

Большинство электростанций работает с паровыми турбинами. В работающих на угле электростанциях энтропия создается посредством сгорания угля в паровом котле. В атомных электростанциях энтропия создается в ядерном реакторе посредством расщепления атомного ядра урана или плутония.

Когда энтропия покидает электростанцию, ее температура только немного выше, чем температура окружающей среды. В этом случае энтропия обычно отдается в воду больших рек. Если нет возможности отдать энтропию в реки, то применяются охлаждающие башни, которые отводят энтропию в окружающий воздух.

#### Двигатели внутреннего сгорания

В этом случае энтропия создается посредством сгорания горючего материала - бензина или дизельного топлива - внутри двигателя. В значительном количестве энтропия оставляет двигатель вместе с выхлопными газами. Диаграмма потоков, представленная на рис. 11.9, строго говоря, не годится для двигателей внутреннего сгорания, так как энтропия создается внутри этих двигателей.

#### Поршневые паровые машины

До появления электрических двигателей и двигателей внутреннего сгорания поршневые паровые машины были важнейшими двигателями. Они использовались в паровозах и пароходах, в паровых катках и паровых плугах, в качестве привода молотильных машин и других машин на многочисленных фабриках.

Здесь энтропия также создается в паровом котле посредством сжигания угля. После того как пар привел в действие паровую машину, он просто выпускается в воздух. Вместе с выпуском пара в воздух выбрасывается и энтропия.

#### Реактивный двигатель

Реактивные двигатели используются почти на всех больших современных самолетах. Реактивный двигатель совсем не соответствует нашим представлениям о тепловых двигателях. Он не отдает свою энергию посредством импульса вращения на вал, а отдает ее посредством импульса, который в этом случае является носителем энергии, рис. 11. 14. При этом происходит «закачка» импульса из воздуха в самолет.

(Рис. 11.14. Диаграмма потоков энергии реактивного двигателя. (энергия; реактивный двигатель; энергия; энтропия; импульс))

Как и для двигателя внутреннего сгорания энтропия создается в реактивном двигателе посредством сгорания горючего вещества, и уходит из него вместе с отработанными газами.

### Задания

1. Через тепловой двигатель течет поток энтропии 100 Карно/с. Температура на входе равна 150 °С, а на выходе 50 °С. Сколько энергии отдает двигатель в секунду с импульсом вращения, являющегося носителем энергии?

2. Мощность, то есть поток энергии, электростанции равна 1000 МВт. Температура пара на входе турбины равна 750 К, на выходе 310 К. Каков поток энтропии, который вытекает с охлаждающей водой? Каков поток энергии, который несет поток энтропии?

3. Подумай о возможностях использования встречающейся в природе энтропии при высокой температуре. Обсуди также возможности, которые кажутся не реальными.

### 11.6 Потери энергии

Часть воды на пути от водяного крана до наконечника шланга (рис. 11.15) бесполезно разбрызгивается. От водяного крана выходит 2 литра воды в секунду, а до наконечника шланга доходит только 1,8 литра в секунду. Разница, составляющая 0,2 литра в секунду, теряется из-за отверстия в шланге. Следовательно, мы имеем потерю 0,2 л/с. Можно выразить эту потерю в процентах относительно

первоначального значения. Обозначим потерю воды, выраженную в %, через  $V$ . В нашем случае имеем

$$V = ((0,2 \text{ л/с}) / (2 \text{ л/с})) * 100\% = 10\%$$

Почти во всех устройствах, в которых энергия перезагружается на другие носители, и почти во всех линиях передачи энергии теряется ее часть. Что это означает? Не может же энергия исчезнуть! Все происходит аналогично тому, что происходит с водой на рис. 11.15: Часть энергии не приходит туда, куда она должна была придти, а уходит, так сказать, в сторону.

(Рис. 11.15. Через отверстие в шланге часть воды теряется.)

Потери энергии происходят почти всегда при создании энтропии. Рассмотрим водяную турбину. До сих пор мы представляли диаграмму потоков водяной турбины так, как это показано на рис. 11.16 (см. также рис. 11.10). В действительности этот рисунок представляет собой не реальную, а идеальную турбину. В каждой реальной турбине невольно создается энтропия: из-за трения воды о стенки труб, из-за трения в самой воде («внутреннее трение») и из-за трения в подшипниках вала турбины. Созданная энтропия уходит из турбины также различными путями. Часть энтропии уходит в вытекающую воду, часть в воздух окружающей среды.

(Рис. 11.16. Диаграмма потоков энергии идеальной водяной турбины. (энергия; водяная турбина; энергия; вода; импульс вращения))

С указанной выше энтропией теряется также энергия. На рис. 11.17 показана диаграмма потоков энергии реальной турбины. Посредством различной ширины стрелок показаны силы соответствующих потоков энергии.

(Рис. 11.17. Диаграмма потоков энергии реальной водяной турбины. (энергия; водяная турбина; энергия; вода; энтропия; энергия; импульс вращения))

Обозначим силу потока теряемой энергии через  $P_V$ . Тогда связь между созданной энтропией и потерянной энергией будет следующей

$$P_V = T * I_{S \text{ созданный}},$$

а потери машины в процентах равны

$$V = (P_V / P_{\text{втекающий}}) * 100\% \quad (6)$$

Здесь  $P_{\text{втекающий}}$  обозначает силу втекающего в машину потока энергии.

На рис. 11.18 представлена диаграмма потоков энергии реального электродвигателя. Здесь также невольно создается энтропия. Часть этой энтропии возникает в этом случае в проводах (в случае протекания электрического тока в проводах всегда будет создаваться энтропия), а другая часть в подшипниках.

(Рис. 11.18. Диаграмма потоков энергии реального электродвигателя. (энергия; электродвигатель; энергия; электрический ток; энергия; энтропия; импульс вращения))

Следует указать, что потери энергии в обычном электрическом кабеле также определяются по формуле (6).

Мы видели, что потери энергии объясняются созданием энтропии. Понятно естественное желание избежать этих потерь. Поэтому

### **избегай создания энтропии.**

Для некоторых переагрузчиков энергии эти потери очень велики. В таблице 11.1 представлено несколько типичных значений этих потерь.

(Таблица 11.1. Типичные значения потерь энергии. (потеря; большая паровая турбина; большой электродвигатель; игрушечный электродвигатель; элемент солнечной батареи; тепловая электростанция, атомная электростанция))

Возможно тебя удивят большие потери энергии тепловых электростанций, меньшая часть которых происходит в паровой турбине и в генераторе. Основные потери обусловлены созданием энтропии в процессе горения или в реакторе. Как можно здесь говорить о потерях? Не должны ли мы эту энтропию сознательно создавать для того, чтобы тепловые электростанции могли функционировать? Не обязательно.

Можно было бы в принципе энергию угля (или урана) непосредственно переагружать на электричество без обходного пути через энтропию и импульс вращения. Приборы, которые это реализуют, называются *топливными элементами*. Они функционируют аналогично батарее. Топливный элемент в сущности представляет собой батарею, в которой использованный материал постоянно подводится вновь. До сегодняшнего дня топливные элементы работают только с очень чистыми жидкими или газообразными топливными материалами, а не с углем. Однако, срок службы таких элементов недостаточно большой для того, чтобы они могли конкурировать с обычными электростанциями.

### **Задания**

1. Мощность двигателя автомобиля (поток энергии через вал) 20 кВт. До колес автомобиля доходит только 18 кВт, так как в коробке передач и в подшипниках (из-за трения) создается энтропия. Как велики эти потери в процентах?

2. Электродвигатель, потери которого составляют 40%, потребляет 10 Вт. Сколько энергии отдает этот электродвигатель в секунду с импульсом вращения? Сколько энтропии создает двигатель в секунду? (Температура окружающей среды составляет 300 К.)

3. Генератор, имеющий 8% потерь, переносит с электричеством поток энергии силой 46 кВт. Какова сила потока энергии, которая посредством вала втекает в генератор? Какова сила потока теряемой энергии? Каков по величине поток созданной энтропии? (Температура окружающей среды составляет 300 К.)

### 11.7 Связь между содержанием энтропии и температурой

Если к телу подводится энтропия, то растет его температура. По крайней мере это происходит с теми устройствами, с которыми мы до сих пор имели дело. (Ниже мы познакомимся с устройствами, в которых дело обстоит иначе.)

От чего зависит насколько разогревается тело, если ему сообщить определенное количество энтропии?

Во-первых, естественно, от размеров тела или точнее от его массы. Мы можем это выразить также и так: Два тела А и В состоят из одного и того же материала. Тело А имеет вдвое большую массу, чем В. При одной и той же температуре тело А будет содержать вдвое больше энтропии по сравнению с телом В.

Во-вторых, содержание энтропии зависит от того, из какого материала, изготовлен рассматриваемый предмет. На рис. 11.19 показано, как растет температура с ростом содержания

энтропии, причем для одного тела из меди, а для другого из алюминия; оба тела имеют одинаковую массу, равную 1 кг. На основании этого рисунка можно сделать вывод, что для нагрева меди до заданной температуры необходимо меньше энтропии, чем для алюминия. Например, при температуре 300 К медь содержит около 500 Карно, а алюминий около 1000 Карно, что вдвое больше чем у меди.

Или, с другой стороны, определенное количество энтропии разогреет медь сильнее чем алюминий: 500 Карно энтропии разогреют медь до температуры 300 К, а алюминий только до 150 К.

(Рис. 11.19. Зависимость температуры от содержания энтропии для 1 кг меди и 1 кг алюминия. (К; медь; алюминий; Карно))

Если интересоваться только тем, что происходит в области нормальной температуры окружающей среды, то целесообразно сдвинуть отсчеты по координатным осям. Ниже представлены графики, рис. 11.20, в области нормальной температуры.

(Рис. 11.20. Температура в зависимости от содержания энтропии для 1 кг (а) меди, (б) железа, (с) алюминия, (d) жидкого топлива и (е) воды. Шкала энтропии начинается не со значения  $S = 0$  Карно. Температурная шкала начинается не со значения абсолютного нуля, а со значения нуля градусов по шкале Цельсия. (К; медь; алюминий; Карно))

Из рис. 11.20, на котором представлены зависимости для 1 кг меди, железа, алюминия, жидкого топлива и воды, видно, что чем круче кривая, тем меньше энтропии требуется для того, чтобы обеспечить необходимое приращение температуры.

### Задания

1. Одному килограмму меди и одному килограмму алюминия, находящимся при температуре  $25^{\circ}\text{C}$ , сообщается 80 Карно энтропии. Какой из этих двух металлов разогреется больше? Во сколько раз отличаются приращения температур для этих металлов?

2. Сколько энтропии необходимо для того, чтобы нагреть 100 л воды от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ ? (1 л воды имеет массу равную 1 кг).

### 11.8 Связь между энергией и изменением температуры

Для разогрева воды необходимо подвести к ней энтропию. Отметим, что вместе с энтропией в воду поставляется и энергия. Это обстоятельство широко известно. Все знают, что разогрев воды стоит денег и что эти деньги выплачиваются за потребленную энергию.

Теперь мы хотим получить формулу, которая давала бы нам информацию о потреблении энергии при нагревании воды. Мы обозначим через  $\Delta E$  энергию, которая должна быть затрачена на нагрев воды. Отметим, что эту энергию не следует путать с общей содержащейся в воде энергией. Для того чтобы нагреть 1 кг воды от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ , необходимо определенное количество энергии. Для того чтобы нагреть 2 кг воды от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ , необходимо, разумеется, вдвое больше энергии. Следовательно:

$$\Delta E \sim m$$

Необходимая для нагревания энергия пропорциональна массе воды.

Кроме того, необходимая для разогрева энергия  $\Delta E$  зависит еще и от того,

насколько градусов Цельсия мы хотим повысить температуру воды. Если мы хотим увеличить температуру воды на  $20^{\circ}\text{C}$ , то нам необходимо больше энергии, чем если бы мы хотели увеличить ее лишь на  $10^{\circ}\text{C}$ . Подведем к определенному количеству воды энергию электрокипятильником и измерим приращение температуры  $\Delta T$  в зависимости от подаваемой энергии  $\Delta E$ . При этом мы устанавливаем, что  $\Delta T$  пропорционально  $\Delta E$

$$\Delta E \sim \Delta T.$$

Это соотношение не применимо при очень высоких и при очень низких температурах, однако в области температур, лежащих в диапазоне между  $0^{\circ}\text{C}$  и  $100^{\circ}\text{C}$ , это соотношение выполняется довольно точно. С учетом предыдущей пропорциональности имеем

$$\Delta E \sim m * \Delta T.$$

Для получения уравнения из этого соотношения пропорциональности введем коэффициент пропорциональности  $c$ :

$$\Delta E = c * m * \Delta T$$

Коэффициент  $c$  называют *удельной теплоемкостью вещества*. Для того чтобы левая и правая части этого уравнения имели одинаковую размерность, удельная теплоемкость вещества должна быть измерена в Дж/(кг \* К).

Необходимо отметить, что величина удельной теплоемкости вещества зависит от материала тела, которое мы нагреваем или охлаждаем. Удельная теплоемкость воды

$$c = 4180 \text{ Дж}/(\text{кг} * \text{К}).$$

### Задания

1. Поллитра воды должны быть нагреты с помощью электрокипятильника мощностью 500 Вт с  $25^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ , то есть до кипения. Сколько времени потребуется для этого? (1 л воды имеет массу 1 кг.)

2. Сколько энергии потребуется для пятиминутного душа?

Сначала подсчитай сколько теплой воды потребляется во время пятиминутного душа.

Прими, что во время душа в секунду из крана вытекает 0,1 л воды, и что вода втекает в электронагреватель при температуре  $15^{\circ}\text{C}$ , а вытекает из него при температуре  $45^{\circ}\text{C}$ .