

Физика



Калашников Николай Павлович

Заведующий кафедрой общей физики Национального исследовательского ядерного университета – МИФИ, доктор физико-математических наук, профессор. Автор более 300 научных работ.



Красин Валерий Павлович

Заведующий кафедрой «Физика» Московского государственного индустриального университета (ГОУ МГИУ), доктор физико-математических наук, профессор. Автор более 80 научных работ.



Муравьёв Сергей Евгеньевич

Доцент, заместитель заведующего кафедрой Теоретической физики Национального исследовательского ядерного университета – МИФИ, кандидат физико-математических наук. Автор более 50 научных работ.

Тепловые насосы

Можно ли, затратив некоторое количество электрической энергии, передать в помещение количество теплоты, большее этой энергии? С одной стороны нельзя, ведь это запрещено законом сохранения энергии. А с другой... Нельзя ли эту энергию потратить не непосредственно на отопление, а на то, чтобы взять энергию у холодной окружающей среды и передать тёплому помещению? Именно в этом и состоит основная идея теплового насоса. Удивительно, но ещё в середине XIX века Вильям Томсон (лорд Кельвин) ввёл понятие динамического способа отопления, при котором «помещение получает теплоту и от горячей «топки» и от холодной окружающей среды. Общее количество теплоты может превзойти теплоту, полученную от «топки» при обычном способе отопления». Давайте посмотрим, как это получается.

1. Коэффициент полезного действия теплового двигателя

Циклически работающий двигатель, который совершает работу за счёт полученной извне *внутренней энергии*, называется *тепловым двигателем*. Цикличность работы двигателя означает, что рабочее ве-

щество или рабочее тело двигателя (как правило, газ, который, собственно, и совершает работу) проходит ряд процессов и состояний и в результате возвращается в исходное состояние. Поэтому изменение внутренней энер-

гии ΔU рабочего тела за цикл равно нулю. Согласно первому закону термодинамики

$$Q = \Delta U + A. \quad (1)$$

Итак, работа A рабочего тела двигателя над внешними телами в течение цикла равна полному количеству теплоты Q , полученному рабочим телом за цикл: $A = Q$. Если в течение цикла рабочее тело получает от какого-то тела (которое называют нагревателем) количество теплоты Q_1 , а отдаёт другому телу (которое называют холодильником) количество теплоты Q_2 , то согласно (1) имеем для работы двигателя (рабочего тела двигателя) за цикл

$$A = Q_1 - Q_2. \quad (2)$$

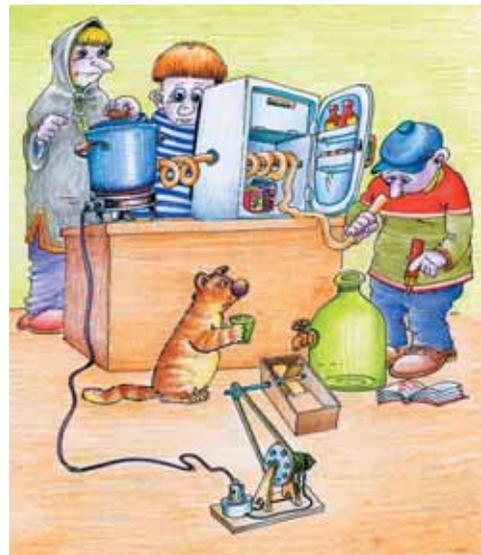
Из формулы (2) следует, что чем меньше энергии рабочее тело отдаёт холодильнику, тем эффективнее двигатель использует внутреннюю энергию, полученную от нагревателя. Тепловой двигатель характеризуют коэффициентом полезного действия η (КПД), который показывает, какую часть взятой у нагревателя внутренней энергии двигатель превращает в механическую работу. Другими словами, КПД двигателя есть отношение совершаемой за цикл работы A к количеству теплоты Q_1 , полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{A + Q_2}. \quad (3)$$

Из определения КПД и первого закона термодинамики следует, что КПД теплового двигателя не может превосходить единицу (или 100%). Однако первому закону термодина-

мики не противоречит и равенство КПД двигателя единице (если у двигателя нет холодильника).

Французский инженер С. Карно на основе обобщения теоретического и экспериментального материалов сформулировал принцип, согласно которому сконструировать тепловой двигатель без холодильника невозможно. Или, другими словами, *невозможно взять внутреннюю энергию у нагревателя и целиком превратить её в механическую работу в циклическом процессе.*



Часть взятой внутренней энергии должна остаться в виде внутренней энергии и быть передана другому телу с меньшей температурой – холодильнику. Этот принцип называется вторым законом (или началом) термодинамики. Из второго закона термодинамики вытекает, что КПД любого теплового двигателя строго меньше единицы:

$$\eta < 1. \quad (4)$$

2. Цикл Карно

Напомним, что процесс перехода термодинамической системы из со-

стояния A в состояние B называется обратимым, если систему мож-

но вернуть обратно из состояния B в состояние A через ту же последовательность состояний, что и в прямом процессе перехода из состояния A в состояние B . При этом во всех окружающих телах не должно остаться никаких изменений.

Карно доказал, что если имеется один нагреватель с температурой T_1 и один холодильник с температурой T_2 , то максимальным КПД будет обладать цикл, состоящий из двух адиабат и двух изотерм, причём каждый этап цикла должен быть достаточно медленным, чтобы каждый из этапов был обратимым. Такой цикл называется циклом Карно. Тепловая машина, работающая по циклу Карно, является идеальной. На рис. 1 а изображена схема работы тепловой машины, а цикл Карно для идеального газа показан на рис. 1 б. В этом цикле рабочее тело двигателя получает количество теплоты Q_1 от нагревателя в изотермическом процессе 1-2 (при температуре нагревателя), а отдаёт холодильнику количество теплоты Q_2 в изотермическом процессе 3-4 (при температуре холодильника).

Карно вычислил КПД идеальной тепловой машины, который оказался равным

$$\eta_{\text{КАРНО}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (5)$$

3. Обратный цикл Карно

В цикле Карно передача теплоты от нагревателя рабочему телу или от рабочего тела холодильнику происходит при одинаковых температурах нагревателя и рабочего тела или рабочего тела и холодильника соответственно. Поэтому цикл Карно обратим, и его можно провести в обратном направлении. Давайте посмотрим,

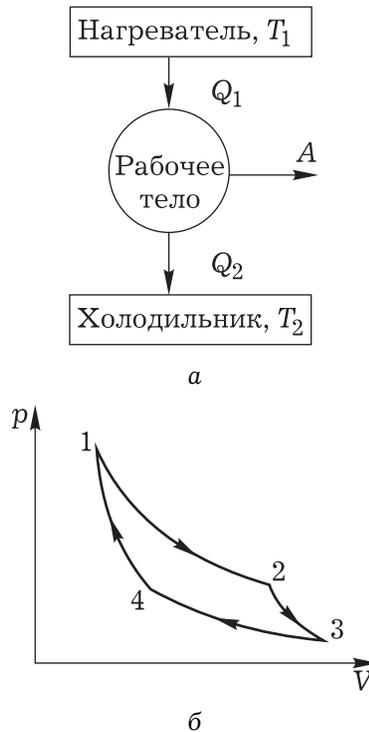


Рис. 1. Принципиальная схема тепловой машины (рис. 1 а) и цикл Карно (рис. 1 б) для идеального газа, состоящий из двух адиабат (процессы 2-3 и 4-1) и двух изотерм (процессы 1-2 и 3-4).

КПД любого циклического процесса, использующего те же нагреватель и холодильник, всегда меньше КПД тепловой машины Карно:

$$\eta < \eta_{\text{КАРНО}}. \quad (6)$$

какие изменения с холодильником, рабочим телом и нагревателем происходят в тепловой машине, работающей по обратному циклу Карно или, другими словами, проведём анализ энергетического эффекта обратного цикла Карно, принципиальная схема которого показана на рисунке 2. Поскольку этот процесс явля-

ется обратным по отношению к тепловому двигателю, в нём происходят следующие энергетические превращения.

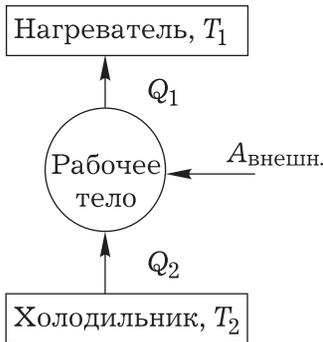


Рис. 2. Принципиальная схема обратного цикла

Рабочее тело получает от холодного тела (холодильника) количество теплоты Q_2 , внешние силы совершают над рабочим телом механическую работу $A_{\text{внешн}}$, которая превращается во внутреннюю энергию и вместе с энергией, полученной от холодильника, передаётся более горячему телу – нагревателю. Таким образом, в результате обратного цикла количество теплоты Q_2 передаётся от холодного тела горячему и внешними телами совершается работа $A_{\text{внешн}}$. Поэтому для обратного цикла справедливо следующее балансовое соотношение:

$$Q_1 = A_{\text{внешн}} + Q_2. \quad (7)$$

4. Тепловой насос

Тепловым насосом называют устройство, предназначенное для перекачки теплоты от холодного тела (наружного воздуха, например) к горячему телу (помещению, например). Принципиальная схема работы теплового насоса иллюстрируется рисунком 3, на котором показаны ос-

Здесь Q_1 – количество теплоты, которое получил за цикл нагреватель.

Рассмотренный процесс не противоречит тому, что самопроизвольно теплота всегда передаётся только от горячего тела к холодному, ведь в этом процессе кроме передачи теплоты от холодного тела к горячему совершается работа. Действительно, второй закон термодинамики в одной из своих формулировок (по Клаузиусу) говорит, что «невозможен такой процесс, единственным результатом которого была бы передача энергии в форме теплоты от холодного тела к горячему». А в рассмотренном процессе переход энергии в форме теплоты от холодного тела к горячему – процесс не единственный. Наряду с передачей теплоты от холодильника к нагревателю происходит превращение механической энергии внешних тел во внутреннюю энергию нагревателя.

Очевидно, обратный цикл Карно можно применить в *холодильной установке* и *тепловом насосе*. Действительно, рассмотренный циклический процесс можно использовать в холодильной установке для поддержания холодильника при низкой температуре, а также в *тепловом насосе* для нагревания нагревателя (помещения) с помощью внутренней энергии, которая забирается у холодильника (наружного воздуха).

новные потоки энергии в тепловом насосе.

Проведём с газом (рабочим телом насоса) обратный цикл Карно, используя в качестве холодильника холодную «улицу», а в качестве нагревателя тёплый «дом». Результатом этого процесса будет перекачивание энергии с «улицы» в «дом», т. е.

его обогрева. Для осуществления этого процесса необходимо совершать работу, которая также будет тратиться на нагревание «дома». Если в течение цикла «на улице» взято количество теплоты Q_2 и совершена работа $A_{\text{внешн}}$, то в «дом» передано количество теплоты (7).

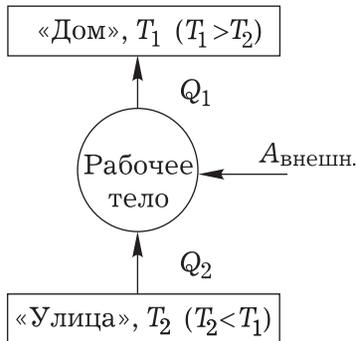
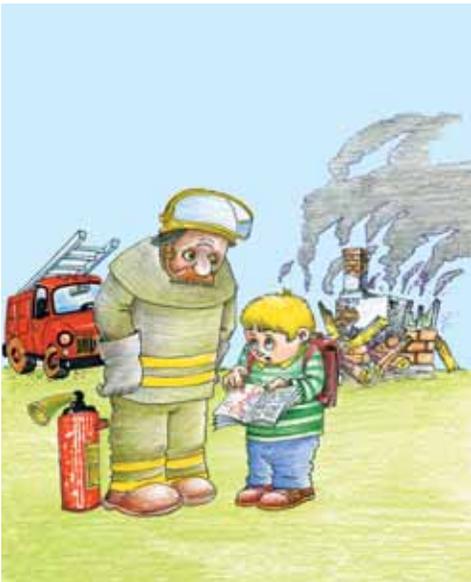


Рис. 3. Схема работы теплового насоса

Итак, в рассмотренном процессе теплота передаётся не от тёплого «дома» холодной «улице», а наоборот. (Конечно, теплопроводность стен, теплообмен через окна и т. д. приводят к «обычному» направлению потоков тепла – от горячего к холодному.



При отоплении дома в первую очередь следует позаботиться об их уменьшении). Этот процесс может осуществить кондиционер воздуха, установленный «задом наперёд» в том смысле, что холодильником является «улица», а нагревателем «дом».

Эффективность работы теплового насоса можно характеризовать коэффициентом теплопередачи (коэффициентом эффективности), равным отношению количества теплоты, которое получило отапливаемое помещение, к работе внешних сил:

$$k = \frac{Q_1}{A_{\text{внешн}}}.$$

Для теплового насоса, работающего по обратному циклу Карно,

$$k = \frac{T_1}{T_1 - T_2}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что чем меньше разность температур между отапливаемым помещением и окружающей средой, тем меньше нужно затратить механической (в бытовых тепловых насосах – электрической) энергии для передачи того же самого количества теплоты от «улицы» к «дому». Обратим внимание читателя на тот факт, что величина k является обратной к КПД теплового двигателя, работающего по прямому циклу, и потому всегда больше единицы ($>100\%$). Отметим также, что в качестве цикла теплового насоса можно использовать не только обратный цикл Карно, но и любой другой циклический процесс, в котором внешние силы совершают над рабочим телом положительную работу.

Рассмотрим иллюстративный пример. Пусть комнатная температура равна $T_1 = 300$ К, а температура на улице $T_2 = 273$ К. Тогда из формулы (8) получаем значение коэффициента теплопередачи:

$$k = \frac{300}{300 - 273} = 11.$$

Это означает, что при подаче в «дом» 11 Дж теплоты 10 Дж отбирается у холодного наружного воздуха (с «улицы») и всего 1 Дж механической энергии расходуется для приведения насоса в действие (и, кстати, также используется для обогрева «дома»).

Если отапливать помещение с помощью обычных электронагревателей, то количество теплоты, выделяемое в нагревательных элементах, в точности равно расходу электроэнергии. Если же эту электроэнергию использовать для приведения в действие «теплого насоса», в котором «нагревателем» служит отапливаемое помещение, а «холодильником» – наружная атмосфера, то отапливаемое помещение получит большее количество теплоты, чем его выделилось бы при непосредственном преобразовании электроэнергии во внутреннюю в электронагревателях.

Рассмотрим ещё один пример. Пусть для обогрева здания используется нефть, газ или уголь, которые сжигаются в котельной. Пусть при сжигании некоторого количества топлива выделяется количество теплоты Q . Если эту теплоту использовать для отопления напрямую, то на отопление может пойти около 70% химической энергии (характерное значение КПД бытовых котельных):

$$Q_{\text{полезн},1} = 0,7 Q. \quad (9)$$

С помощью теплового насоса можно значительно более эффективно обогревать здание, используя химическую энергию углеводородов. Действительно, поскольку температуры горения нефти, газа и угля довольно высоки (~ 2000 К), около 85% химической энергии углеводородного

топлива могут быть преобразованы в механическую работу (с помощью прямого цикла, задача которого дать механическую работу, приводящую в действие тепловой насос):

$$A = \eta Q = \frac{2000 - 300}{2000} Q = 0,85 Q. \quad (10)$$

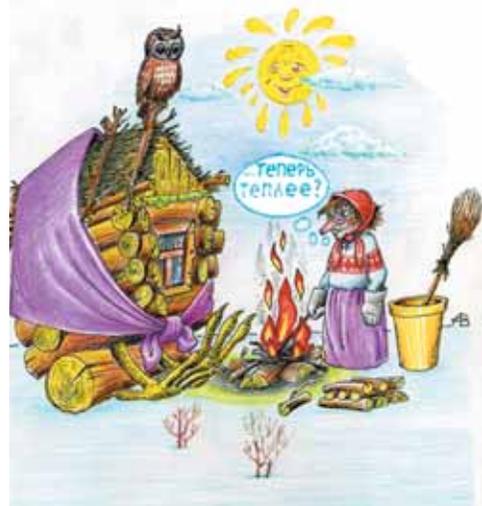
Здесь η – КПД двигательной установки насоса, 300 К – температура холодильника этой установки, которым является окружающий воздух.

Используем теперь полученную работу A в идеальном тепловом насосе. Если комнатная температура $T_1 = 300$ К, а наружная $T_2 = 273$ К, то из формулы (8) получаем для коэффициента теплопередачи насоса (коэффициента эффективности)

$$k = \frac{300}{300 - 273} = 11. \quad (11)$$

Поэтому на отопление «дома» пойдёт количество теплоты

$$Q_{\text{полезн},2} = 11A = 11 \cdot 0,85 \cdot Q = 9,4Q. \quad (12)$$



Из формул (9)–(12) заключаем, что эффективность непосредственного сжигания топлива для отопления «дома»

$$\eta_{\text{сжигания}} = \frac{Q_{\text{полезн},1}}{Q_{\text{полезн},2}} = 0,075,$$

т.е. составляет только 7,5% (!). В этой связи мы можем повторить слова Д.И. Менделеева (сказанные, правда,

по другому поводу, но также относительно сжигания нефти для отопления), что «топить можно и ассигнациями».

5. Применение тепловых насосов

Тепловые насосы широко используются за рубежом. В развитых странах налажено массовое производство тепловых насосов. По утверждениям производителей существующие сегодня насосы позволяют получить количество теплоты Q , затратив $Q/4$ электрической энергии. Существуют разные типы тепловых насосов – использующие в качестве холодильника холодный атмосферный воздух, подземные грунтовые воды, которые и зимой, и летом имеют одинаковую температуру, воду рек или озёр, температура которой не опускается ниже 4°C . В настоящее время тепловые насосы находят применение и в России. По прогнозу Мирового энергетического комитета к 2020 году с помощью тепловых насосов будет получаться 75% «бытового» тепла.

ческого комитета к 2020 году с помощью тепловых насосов будет получаться 75% «бытового» тепла.



6. Заключение

Подведём итоги. Тепловой насос представляет собой способ отопления дома с помощью внутренней энергии холодной улицы. Такой процесс невозможен без совершения работы, которая

собственно насосом и совершается. Полученная для отопления энергия существенно превосходит совершённую насосом работу, в чём и состоит выгода использования тепловых насосов.

Список литературы

1. *Орир Дж.* Физика. – М.: МИР, 1981. Т. 1. Глава 14. § 1-4. С. 213-222.
2. *Яворский Б.М., Пинский А.А.* Основы физики. – М.: Наука, 1981. Т. 1. Гл. 29. § 29.1-29.8. С. 265-273.
3. *Савельев И.В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1988. Т. 1. Гл. XII. § 104-105. С. 310-349.
4. *Трофимова Г.И.* Курс физики. – М.: Высшая школа, 1990. Гл. 9. § 59. С. 100-102.
5. *Лободюк В.А., Рябошапка К.П., Шулишова О.И.* Справочник по элементарной физике. – Киев: «Наукова думка», 1975. § 5. С. 179-180.
6. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. – М.: Наука, 1985. Гл. II.4. § II.4.1-II.4.3. С. 117-123.
7. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. § 39. С. 119-131.