

ГЛАВА 3. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

§ 21. РАБОТА ПАРА И ГАЗА ПРИ РАСШИРЕНИИ

Тепловыми двигателями называют машины, в которых внутренняя энергия топлива превращается в механическую энергию

1⁰. Мы уже говорили о том, что развитие техники зависит от умения использовать громадные запасы внутренней энергии, содержащиеся в топливе.

Использовать внутреннюю энергию – значит совершить за счет нее полезную работу. Например, поднять груз, перевезти вагоны, поднять в воздух самолёт или ракету. А это, в свою очередь, означает, что *внутреннюю энергию необходимо преобразовать в механическую энергию*. Рассмотрим некоторые способы подобного преобразования энергии. Покажем, что пар или газ, расширяясь, могут производить работу.

2⁰. Изготовить простейшие паровые двигатели, способные преобразовывать *внутреннюю энергию топлива в механическую энергию*, очень просто.

Пример 1. В пробирку нальем немного воды, плотно закроем ее пробкой и нагреем воду до кипения на спиртовке, *рис. 1.3а*. При нагревании в закрытой пробкой пробирке увеличивается количество пара, находящегося под пробкой, и повышается его давление. Наконец давление пара выталкивает пробку, сообщая ей значительную скорость. Пробка подлетает высоко вверх. Таким образом, *часть внутренней энергии пара преобразовалась в механическую энергию*. Но при этом и пробирка, и выходящий пар отдали значительную часть своего тепла (внутренней энергии) окружающему воздуху, имеющему более низкую температуру: *произошло неизбежное частичное рассеивание (диссипация) энергии*.

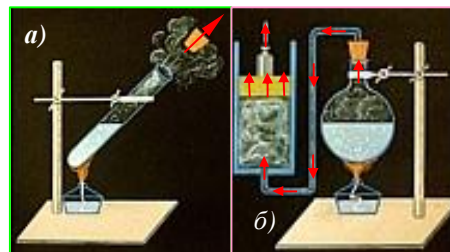


Рис. 1.3. При нагревании воды пламенем спиртовки: а) пар выбивает пробку; б) поднимает поршень с грузом.

Пример 2. Заменяем пробирку металлическим цилиндром, а пробку – плотно пригнанным поршнем, который может двигаться вдоль цилиндра. Подсоединим цилиндр к «котлу» в виде колбы с водой, нагреваемой на той же спиртовке. Мы получим простейший *поршневой паровой двигатель*, в котором сила давления пара на поршень совершает работу, поднимая гирю, *рис. 1.3б*. Механическая (потенциальная) энергия поршня и гири увеличивается. Но и в этом случае часть механической энергии расходуется на трение поршня о стенки, а часть тепла от нагретых деталей установки переходит в более холодный окружающий воздух.

Предупреждение: в описанных опытах очень важно, чтобы «паровые котлы», – пробирка и колба – были достаточно прочными, а давление, в них создаваемое было способно выбить пробку и поднять поршень с гирькой. В противном случае наши установки могут взорваться (как часто происходило с котлами первых паровых машин).

Таким образом, и в первом и во втором примерах внутренняя энергия топлива (спирта) частично превращалась в механическую энергию (кинетическую, потенциальную), а частично рассеивалась – «терялась». К сожалению, природа устроена так, что *всю теплоту, полученную от сгорания топлива, превратить в механическую энергию невозможно*.

3⁰. Теперь смоделируем «одноразовый» поршневой бензиновый двигатель. В таком двигателе топливо сжигается *внутри* цилиндра.

Возьмём прозрачный полый цилиндр, изготовленный из органического стекла, с плотно пригнанным поршнем. На дно цилиндра опустим небольшой кусочек ваты, на который капнем одну каплю бензина. Закроем цилиндр поршнем. Затем резким нажимом руки вдвинем поршень внутрь цилиндра. При этом воздух быстро сжимается, сильно нагревается и вата воспламеняется. При сгорании выделяется тепло, что приводит к резкому увеличению давления под поршнем, которое

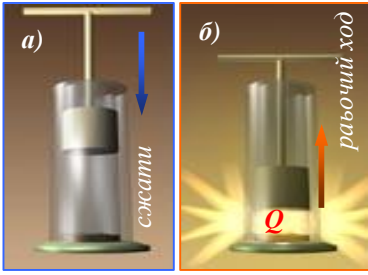


Рис. 2.3. «Одноразовый» двигатель внутреннего сгорания: а) сжатие смеси паров бензина и воздуха; б) расширение горячих продуктов сгорания – рабочий ход.

способно вытолкнуть его с большой силой и совершить значительную работу при расширении горячих продуктов сгорания, рис. 2.3.

Своеобразным примером «одноразового» двигателя внутреннего сгорания является любое огнестрельное оружие. Энергия, выделяющаяся при сгорании пороха, переходит в кинетическую энергию снаряда, рис. 3.3.

4⁰. Обратите внимание, что во всех тепловых двигателях энергия топлива сначала переходит во внутреннюю энергию рабочего тела – пара или газа. Затем рабочее тело,

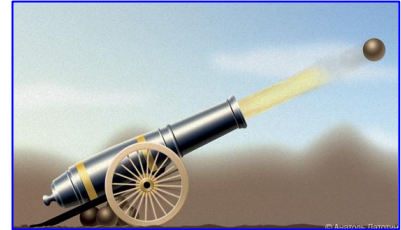


Рис. 3.3. Примером «одноразового двигателя» внутреннего сгорания является любое огнестрельное оружие. Энергия, выделяющаяся при сгорании пороха, переходит в кинетическую энергию снаряда.

расширяясь, совершает механическую работу. При этом оно охлаждается. В процессах преобразования внутренней энергии топлива в механическую энергию, в полезную механическую работу, часть её бесполезно теряется (в результате трения и рассеивания теплоты).

В приведённых выше простейших примерах **рабочим телом** был водяной пар (рис. 1.3) и газообразные продукты сгорания топлива (рис. 2.3 и рис. 3.3).

Полезно вспомнить, что с использованием жидких и газообразных рабочих тел вы уже встречались в 7 классе (в гл. 4) при знакомстве с гидравлическими и пневматическими машинами, а также (в гл.5) при использовании энергии воды и ветра. Однако там речь шла о преобразовании только механической энергии, часть которой также «терялась», переходя во внутреннюю энергию.

4⁰. В настоящее время существуют различные **тепловые двигатели**, способные преобразовывать внутреннюю энергию топлива в механическую энергию. Основными из них являются: **паровая машина, двигатель внутреннего сгорания (ДВС), паровая и газовая турбины, реактивный двигатель.**

С устройством ДВС и паровой турбины мы ознакомимся подробнее в следующих параграфах.

Более подробно о тепловых двигателях и других тепловых машинах можно прочитать в Приложениях к главе 3.



Вопросы

1. Какие устройства называют тепловыми двигателями?
2. Приведите примеры превращения внутренней энергии топлива в механическую энергию.
3. Что такое рабочее тело теплового двигателя?
4. Расскажите подробно о том, какие превращения энергии происходят в тепловых двигателях?
5. Какие виды тепловых двигателей вам известны?

§ 22. ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

1⁰. Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – очень распространенный вид теплового двигателя. Он работает на жидком топливе (бензин, керосин, нефть) или на горючем газе. Топливо и окислитель (воздух) подаются непосредственно в цилиндры двигателя и там сгорают.

Наибольшее распространение получил поршневой **четырёхтактный двигатель** Н. Отто. Двигатели этого типа устанавливают на большинстве современных автомобилей.

Такой двигатель в разрезе изображен на *рис. 4.3*. Поршни 1, находятся внутри цилиндров 2 двигателя. Крайние (верхнее и нижнее) положения поршня в цилиндре называют *мертвыми точками*. Расстояние, проходимое поршнем от одной мертвой точки до другой, называют *ходом поршня*.

В верхней части каждого цилиндра имеется два клапана 3: один из них называется впускным, другой выпускным. При работе двигателя они открываются и закрываются в нужные моменты автоматически. Через первый из них горючая смесь попадает в цилиндр, а через второй продукты сгорания топлива уходят наружу. Поршни 1 соединены с коленчатым валом 4. На этом валу укреплен тяжелый маховик 5, инерция которого повышает равномерность вращения вала.

Один рабочий цикл в двигателе происходит за четыре хода поршня (два оборота), или, как говорит, за четыре *такта*. Поэтому такие двигатели называют *четырёхтактными*.

Один *ход поршня*, или один *такт* двигателя, совершается за пол-оборота коленчатого вала.

2⁰. Рассмотрим подробнее работу такого двигателя на примере одно из его цилиндров, *рис. 5.3*.

1-й такт – впуск, открывается клапан 1. Клапан 2 (выпускной) закрыт. Движущийся вниз поршень засасывает в цилиндр горючую смесь. Для приготовления горючей смеси в двигателе Отто используется специальное устройство – *карбюратор* (на *рис.* не показан).

2-й такт – сжатие. Оба клапана закрыты. Движущийся вверх поршень сжимает горючую смесь, Смесь при сжатии нагревается.

3-й такт – рабочий ход. Оба клапана закрыты. Когда поршень оказывается в верхнем положении, смесь поджигается электрической искрой *свечи* (в верхней крышке цилиндра). В результате сгорания смеси образуются раскалённые газы, давление которых составляет 36 МПа, а температура – 1600-2200°C. Сила давления этих газов толкает поршень вниз. Движение поршня передается коленчатому валу с маховиком. Получив сильный толчок, маховик будет вращаться дальше по инерции, обеспечивая тем самым перемещение поршня и при последующих тактах.

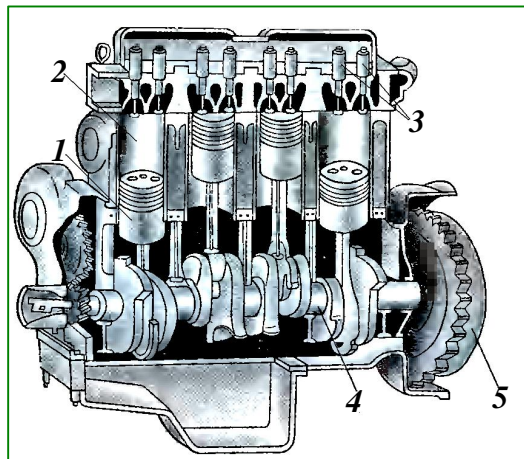


Рис. 4.3. Современный автомобильный четырёхтактный четырёхцилиндровый ДВС, разрез: 1 – поршень; 2 – цилиндр; 3 – впускной и выпускной клапаны; 4 – коленчатый вал; 5 – маховик.

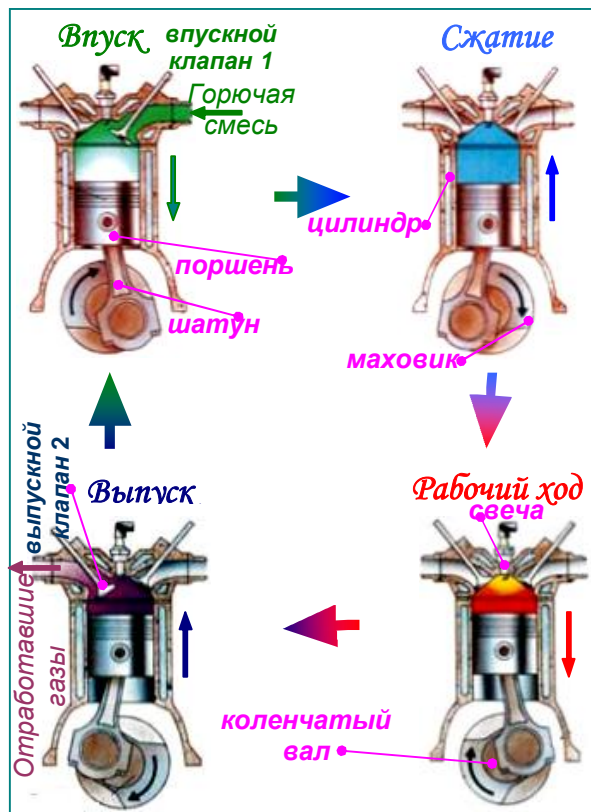


Рис. 5.3. Работа одного цилиндра четырёхтактного двигателя Н. Отто.

4-й такт – **выпуск**, Открывается **выпускной клапан 2**. Клапан **1** закрыт. Поршень движется вверх. Продукты сгорания топлива выталкиваются из цилиндра и через глушитель (на рисунке не показан) выбрасываются в атмосферу.

Далее всё повторяется. И так происходит в каждом цилиндре.

3⁰. Мы видим, что в одноцилиндровом двигателе *полезная работа совершается лишь во время **третьего такта***. В четырехцилиндровом двигателе (см. рис. 4.3) поршни работают таким образом, что во время каждого из четырех тактов один из них совершает рабочий ход. Благодаря этому коленчатый вал получает энергию в 4 раза чаще. При этом увеличивается мощность двигателя и в большей степени обеспечивается равномерность вращения вала.

Частота вращения вала у большинства таких двигателей внутреннего сгорания лежит в пределах от 3000 до 7000 оборотов в минуту, а в некоторых случаях достигает 15000 оборотов в минуту и более,

4⁰. Кроме рассмотренного *ДВС Отто*, в настоящее время широко используется **ДВС Дизеля**, в котором *сжимается не горючая смесь, а воздух*. В процессе этого сжатия температура воздуха поднималась настолько, что при попадании в него топлива оно самовозгорается. Поэтому специального устройства для воспламенения топлива в двигателе Дизеля не требуется; не нужен и карбюратор. Эти двигатели стали называть просто *дизелями*. Двигатели Дизеля являются наиболее экономичными тепловыми двигателями: они работают на дешевых видах топлива и имеют КПД 31-44 % (в то время как КПД карбюраторных двигателей составляет обычно 25-30 %). в настоящее время они применяются на тракторах, тепловозах, теплоходах, танках, грузовиках, передвижных электростанциях.

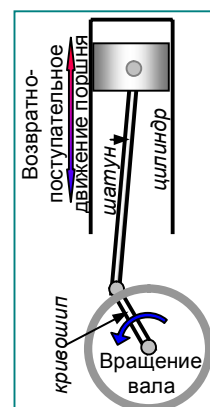


Рис. 6.3.
Кривошипно-шатунный механизм поршневой машины

5⁰. Все современные ДВС относятся к поршневым двигателям, в которых *возвратно-поступательное движение поршня преобразуется во вращательное движение коленчатого вала с помощью кривошипно-шатунного механизма, рис. 6.3*. Во многих случаях это усложняет конструкцию. Это является одной из причин использования турбомашин, с которыми вы познакомитесь ниже.

6⁰. Приведенный ниже рисунок даёт представление о том, как выглядели некоторые первые автомобили по сравнению с современными моделями.



Первые автомобили с двигателями внутреннего сгорания: Даймлера, Бенца, Форда и их современные модели.



Вопросы

1. Пользуясь рис. 4.3, расскажите из каких основных частей состоит двигатель внутреннего сгорания. Зачем они нужны?
2. Из каких тактов состоит каждый рабочий цикл двигателя Отто? Сколько оборотов делает при этом вал двигателя?
3. Какие физические явления происходят в течение каждого такта?
4. Какую роль в двигателе играет маховик? Почему делают многоцилиндровые ДВС?
5. Чем отличается дизельный двигатель внутреннего сгорания от карбюраторного?
6. Как преобразуется возвратно-поступательное движение поршня во вращение вала?

§ 23. ПАРОВАЯ ТУРБИНА

1⁰. В современной технике широко применяют другой тип теплового двигателя. В нем рабочее тело – пар или нагретый до высокой температуры газ вращает вал двигателя без помощи поршня, шатуна и коленчатого вала. Такие двигатели называют *турбинами*.

2⁰. Схема устройства простейшей **паровой турбины** приведена на рис. 7.3. На вал 5 насажен диск 4, по ободу которого закреплены лопатки 2. Около лопаток расположены трубы – сопла 1, в которые поступает пар из котла. Струи пара 3, вырывающиеся из сопел, оказывают значительное давление на лопатки и приводят диск турбины в быстрое вращательное движение.

Таким образом, **в турбинах для получения механической работы используется кинетическая энергия рабочего тела.**

В современных турбинах применяют не один, а несколько дисков, насаженных на общий вал, рис. 8.3. Пар последовательно проходит через лопатки всех дисков, отдавая каждому из них часть своей энергии.

На электростанциях с турбиной соединен генератор электрического тока. Частота вращения вала турбин достигает 3000 оборотов в минуту, что является очень удобным для приведения в движение генераторов электрического тока.

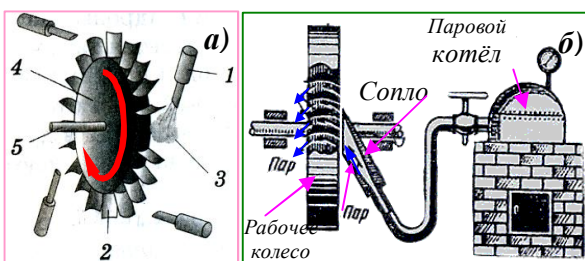
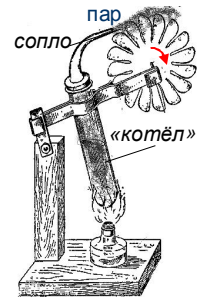


Рис. 7.3. Схема турбины. а) диск и сопла: 1 – сопло; 2 – лопатки; 3 – паровая струя; 4 – диск (рабочее колесо) 5 – вал; б) то же и котёл

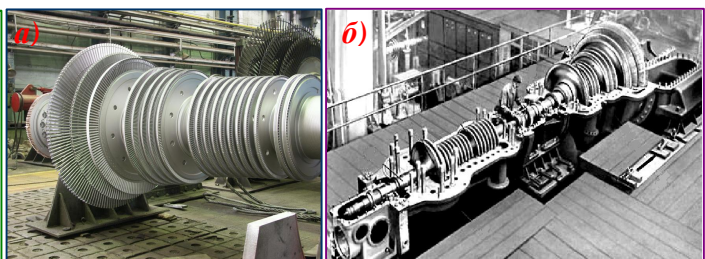


Рис. 8.3. а) Ротор крупной современной паровой турбины. б) Современная паровая турбина в сборочном цеху завода.

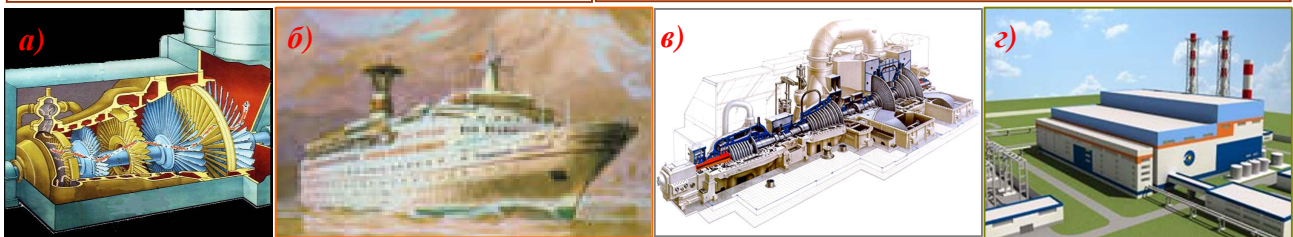


Рис. 9.3. Паровые турбины: а) - макет турбины теплохода, разрез; б) - паротурбоход «Максим Горький», 1969 г; в) - макет паровой турбины для ТЭЦ, разрез; г) - энергоблок ТЭЦ.

В нашей стране строят паровые турбины мощностью от нескольких киловатт до 1 200 000 кВт.

Применяют турбины на тепловых электростанциях и на крупных судах, *рис. 9.3*. На *рис. 10.3* показана схема тепловой электростанции с паровой турбиной.

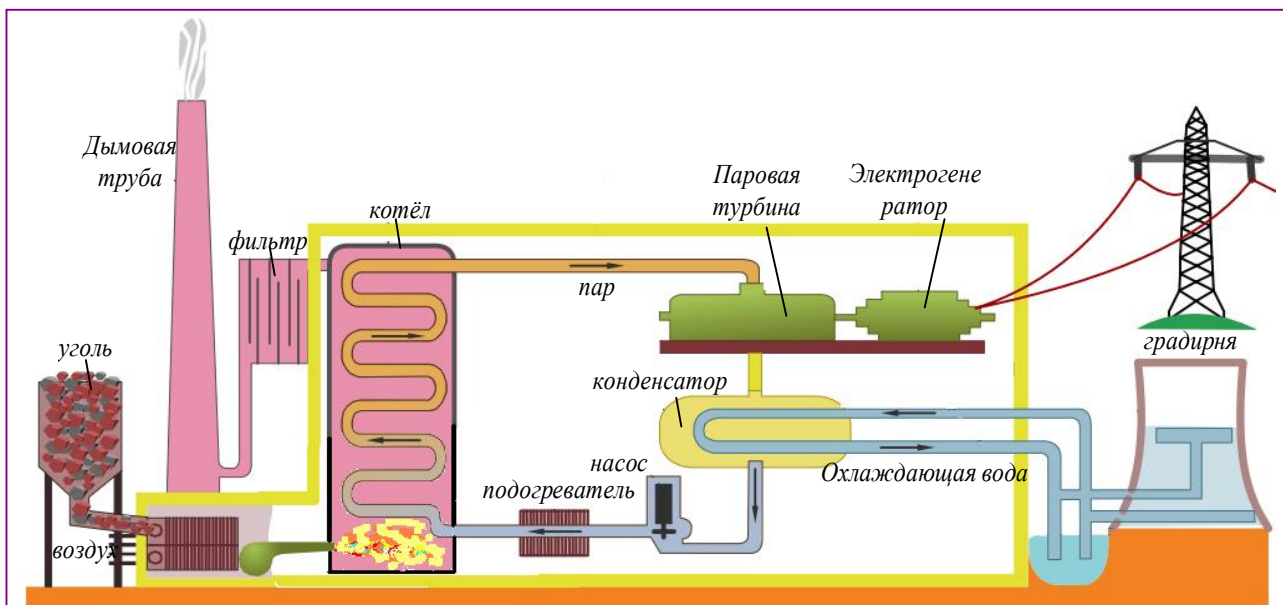


Рис. 10.3. Схема тепловой электростанции с паровой турбиной

3⁰. В современной технике находят широкое применение также **газовые турбины**, в которых вместо пара используются продукты сгорания топлива. Они не требуют тяжёлого парового котла. В этом их важное преимущество перед паровыми турбинами. Газовые турбины используются в авиации, на мощных автомобилях, танках и других машинах большой мощности, *рис 11.3*.



Рис. 11.3. Авиационный газотурбинный двигатель.



Вопросы

1. Какие тепловые двигатели называют турбинами? В чем отличие в устройстве турбин и поршневых машин?
2. Пользуясь *рис. 7.3*, расскажите, из каких частей состоит паровая турбина и как она работает.
3. Чем отличается от паровой газовая турбина?
4. Где применяют паровые и газовые турбины?

§ 24. КПД ТЕПЛОГО ДВИГАТЕЛЯ

1⁰. Любой тепловой двигатель превращает в механическую энергию только малую часть энергии, выделившейся при сгорании топлива. Большая её часть рассеивается и теряется в окружающем пространстве.

Рассмотрим процессы преобразования энергии в двигателе с позиций термодинамики, которая является теорией тепловых машин. Напомним, что её законы по традиции называют **началами**.

Первое начало термодинамики – это просто закон сохранения энергии для тепловых систем (см. §11, п. 6⁰). **Вторым** началом термодинамики называется принцип, утверждающий, что все процессы, связанные с расширением газов, теплообменом и выделением тепла, **самопроизвольно** происходят **только в одном**

направлении (см. §3, п. 6⁰). Газ течёт из области с высоким давлением в область где давление ниже; более нагретое тело отдаёт тепло менее нагретому. Природа устроена так, что *только во время таких переходов может производиться полезная работа A_n* , рис. 12.3.

Но здесь имеется своего рода асимметрия: *работу в тепло можно превратить полностью, а тепло в работу — только частично*. Какая-то доля его неизбежно рассеивается. Повинно в этом не только трение, преобразующее энергию в тепло. Оказывается дело ещё и в том, что **для полного использования кинетической энергии теплового движения молекул необходимо иметь тело, температура которого равна абсолютному нулю** (-273,16 °C). Но это невозможно (см. § 1, п.13⁰). Последнее утверждение называют **третьим началом термодинамики**.

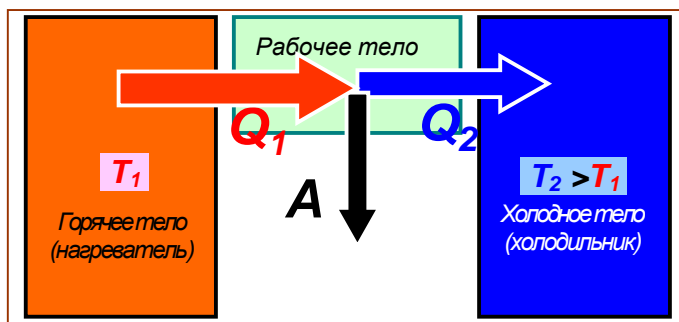
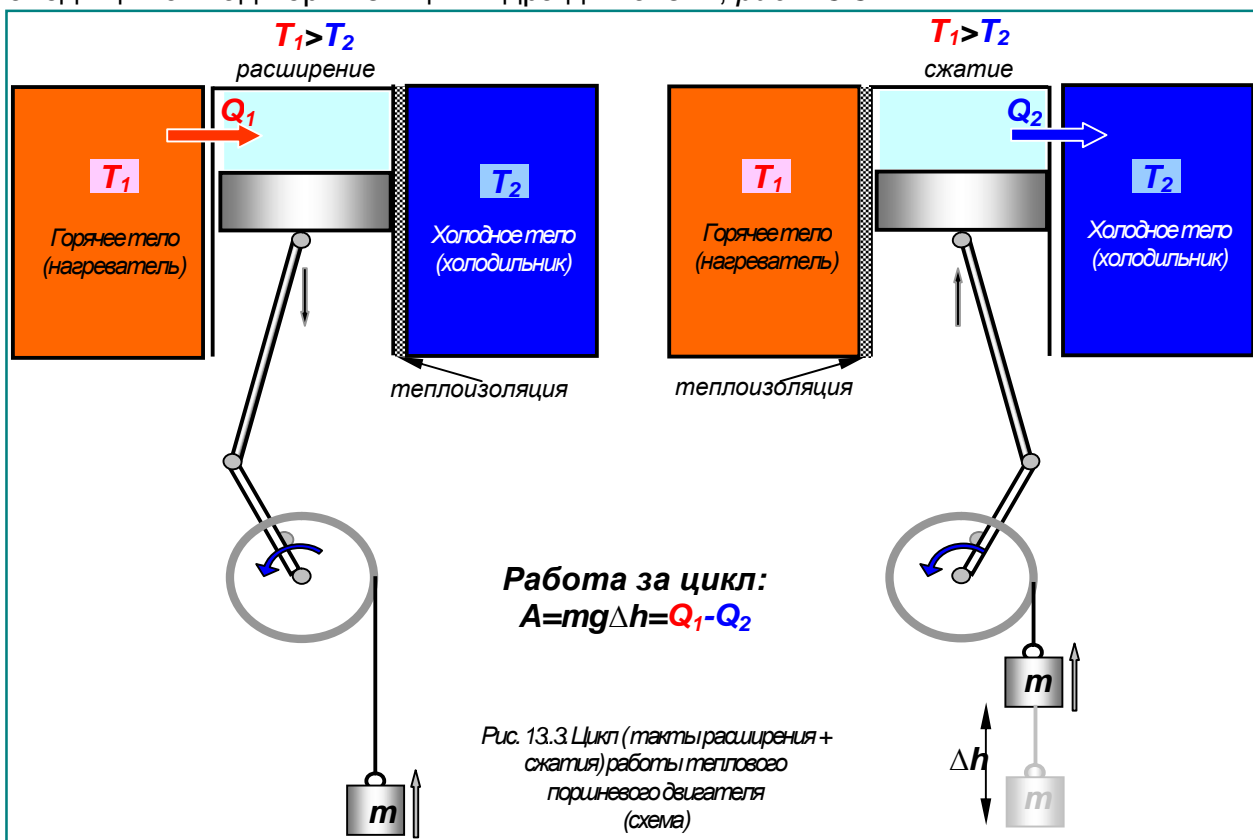


Рис. 12.3. Термодинамическая схема теплового двигателя

2⁰. Анализируя энергетические преобразования в тепловых двигателях, необходимо учитывать, что они включают в себя **нагреватель** и **холодильник**, которые поочерёдно обмениваются теплом с газообразным **рабочим телом**, находящимся над поршнем цилиндра двигателя, рис. 13.3.



За время первого такта **рабочее тело**, контактируя с **нагревателем**, получает от него некоторое количество теплоты Q_1 , расширяется и совершает работу. После того как поршень дойдёт до нижней мёртвой точки, начинается второй такт, за время которого **рабочее тело** отдаёт теплоту Q_2 **холодильнику**¹. При этом **рабочее тело**

¹ В данном примере для простоты рассматривается двухтактный рабочий цикл, в отличие от описанного в §22, четырёхтактного. Для понимания физической сущности явлений это не имеет значения.

охлаждается, над поршнем создаётся относительный вакуум, и поршень движется вверх под действием внешнего давления, совершая работу сжатия. В результате совершения полного цикла, состояние **рабочего тела** (и его внутренняя энергия U) возвращаются в исходное состояние, а груз массой m оказывается поднятым на высоту Δh , *рис. 13.3*. В соответствии с законом сохранения энергии можно написать:

$$A = mg\Delta h = Q_1 - Q_2, \quad [1.3]$$

Т. е. полученная **рабочим телом** за весь цикл теплота ($Q_1 - Q_2$) превращается в работу A , которая увеличивает потенциальную энергию груза на величину $mg\Delta h$.

3°. Инженерам важно знать, какую часть энергии, выделяемой топливом, тепловой двигатель способен превратить в полезную работу A . Чем больше эта часть энергии, тем двигатель экономичнее. На этот вопрос впервые ответил молодой французский инженер Сади Карно.

Для характеристики экономичности различных двигателей вводится понятие *коэффициента полезного действия двигателя* – КПД.

Отношение совершенной двигателем работы A , к энергии, полученной от нагревателя Q_1 , называют термодинамическим коэффициентом полезного действия теплового двигателя – КПД.

Из изложенного следует, что определить KPD_T можно по следующей формуле:

$$KPD_T = A / Q_1 \text{ или } KPD_T = (Q_1 - Q_2 / Q_1) \cdot 100\%, \quad [2.3]$$



С. Карно
1796.–1832 г

где A – совершённая двигателем работа, Q_1 – количество теплоты, полученное от **нагревателя**, Q_2 – количество теплоты, отданное **холодильнику**, ($Q_1 - Q_2$) – количество теплоты, которое пошло на совершение работы A . КПД выражается в процентах.

Например, если двигатель из всей энергии, выделившейся при сгорании топлива, расходует на совершение работы только одну четвертую часть, его коэффициент полезного действия будет равен 1/4 или 25%, так как KPD_T обычно выражают в процентах.

KPD_T двигателя всегда меньше единицы, т. е. меньше 100%.

Например, KPD_T двигателей внутреннего сгорания 20-40%, паровых турбин – выше 30%.

4°. Как видно из формулы [2.3], термодинамический KPD_T зависит от того, сколько удастся забрать тепла от **горячего тела** (желательно как можно больше!), и сколько придётся отдать тепла **холодному телу** (желательно как можно меньше!). Учитывая, что количество переданной теплоты пропорционально разности температур (см. § 9 формулу [3.1]), нетрудно убедиться, что для этого лучше всего иметь как можно более высокую температуру **нагревателя T_1** и как можно более низкую температуру **холодильника T_2** . Чем больше перепад температур $T_1 - T_2$, тем большую работу можно получить от теплового двигателя. Но практически увеличение T_1 ограничено термостойкостью и прочностью материалов двигателя, а уменьшение T_2 ограничено во всяком случае принципиальной недостижимостью температуры абсолютного нуля $T_2 > 0^\circ K = -273,16^\circ C$ (третий закон термодинамики!). Такковы ограничения **KPD_T любых тепловых двигателей.**

Аналогично этому, для получения максимальной мощности (и полезной работы) гидротурбины, высоту уровня воды перед турбиной следует как можно больше увеличить, а уровень воды за турбиной опустить по возможности ниже. Чем **больше перепад уровней** воды Δh (*рис. 14.3*), тем больше можно получить механической работы от водяной турбины (например, на гидроэлектростанции).

И это ещё не всё!

Полезная работа A_n , которую практически удастся использовать, будет всегда ещё меньше работы $A = Q_1 - Q_2 > A_n$, так как всегда имеют место потери, связанные с трением и рассеиванием тепла в окружающую среду всеми деталями реальной

конструкции (ДВС, турбины, ракетного двигателя и т. п.). Поэтому реальный КПД теплового двигателя будет всегда меньше его термодинамического КПД_т.

$$\text{КПД} = A_{\text{п}} / Q_1 < \text{КПД}_t = A / Q_1. \quad [3.3]$$

А теперь подумайте, с какими сложностями приходится разбираться создателям тех реальных машин, которыми мы привыкли пользоваться! Но зато как интересно их совершенствовать!



Вопросы

1. Почему в тепловых двигателях только часть энергии топлива превращается в механическую энергию?
2. Что называют КПД теплового двигателя?
3. Почему КПД двигателя не может быть не только больше 100%, но и равен 100%?
4. К чему приведут механические потери на трение в турбине, установленной на водопаде (рис.12.3), а также хаотическое, турбулентное движение воды под водопадом? В чём аналогия между этим примером и тепловым двигателем?

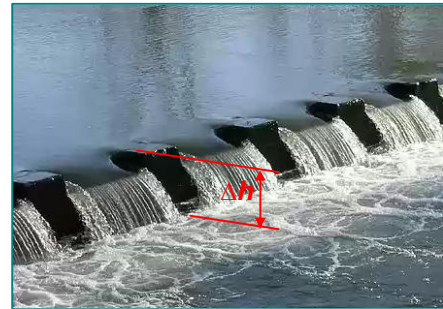
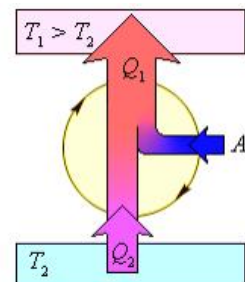
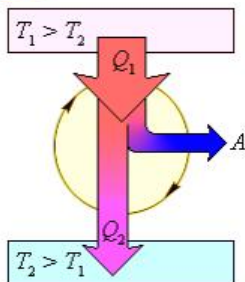


Рис 14.3. Чем больше перепад уровней воды Δh , тем большую мощность можно получить от установленной на плотине водяной турбины. Почему?

Задание 5

Подготовьте доклад на одну из тем (по выбору):

1. История изобретения паровых машин.
2. История изобретения турбин.



§ 24 а. ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА

1⁰. Из термодинамики следует, что можно не только с помощью теплового двигателя теплоту превращать в механическую работу, но, *затратив механическую работу*, можно в *холодильной камере* поддерживать более низкую температуру, чем в окружающей среде. Это можно сделать, заставив процессы теплообмена пойти в противоположную сторону. Поскольку в соответствии со вторым началом это самопроизвольно происходить не может, то для этого *необходимо затратить работу извне*.

Именно это делает в вашем холодильнике насос, который начинает работать при подключении холодильника к электросети. Соответствующий насос необходим по аналогичным причинам (запрета второго начала термодинамики) и в случае, изображённом на рис.12.3, если воду необходимо поднять с нижнего уровня на верхний.

Поняв что, обращённый таким образом тепловой двигатель можно превратить в *тепловой насос*, инженеры создали *холодильники* (бытовые и промышленные).

Рассмотрим подробнее преобразования энергии в этом случае.

2⁰. **Холодильной установкой называется циклически действующее устройство, которое поддерживает в холодильной камере температуру более низкую, чем в окружающей среде (атмосфере).** Это осуществляется путем перехода некоторого количества теплоты от **холодильной камеры** к телу с более высокой температурой – **окружающей среде**. В данном случае такой переход не противоречит второму началу термодинамики, ибо он происходит не

самопроизвольно, а благодаря затрате энергии в форме механической работы A , совершаемой окружающими телами (например, электродвигателем), и превращению её во внутреннюю энергию **нагретого тела (окружающей среды)**.

3⁰. Термодинамическая схема преобразования энергии в холодильной установке показана на рис. 15.3, а её техническая схема – на рис. 16.3.

Рабочим телом в холодильной установке служат обычно пары легкокипящих жидкостей — аммиака, фреона и т. д. Энергия подводится к установке от электрической сети. За счет этой энергии происходит «перекачка» теплоты от холодильной камеры к более нагретому телу — к окружающей среде.

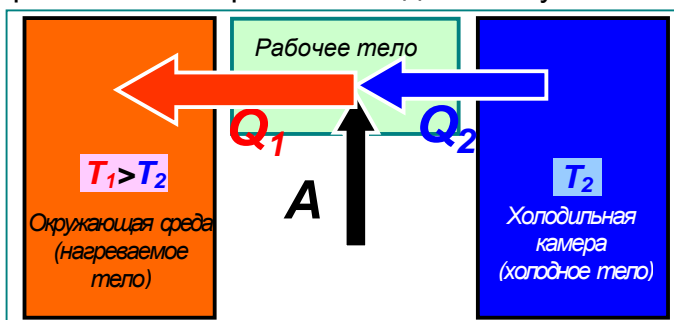


Рис. 15.3. Термодинамическая схема холодильника (теплового насоса).

4⁰. В холодильной установке работа внешних сил при сжатии $A_{сж}$ больше, чем работа расширения рабочего тела $A_{расш}$. За цикл внешние силы совершают положительную работу:

$$A = A_{сж} - A_{расш} = Q_1 - Q_2. \quad [4.3]$$

Холодильным коэффициентом установки называется отношение количества теплоты, отнятого за цикл от холодильной камеры, к работе внешних сил:

$$k = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{(Q_1 - Q_2)} \quad [5.3]$$

Из второго закона термодинамики следует, что

$$k \leq T_2 / (T_1 - T_2). \quad [6.3]$$

Знак равенства относится к идеальному (обратимому) циклическому процессу в холодильной установке, знак неравенства — к реальному (необратимому): чем меньше разность $(T_1 - T_2)$, тем меньше необходимо затратить механической или электрической энергии для «перекачки» теплоты от холодного тела к горячему.

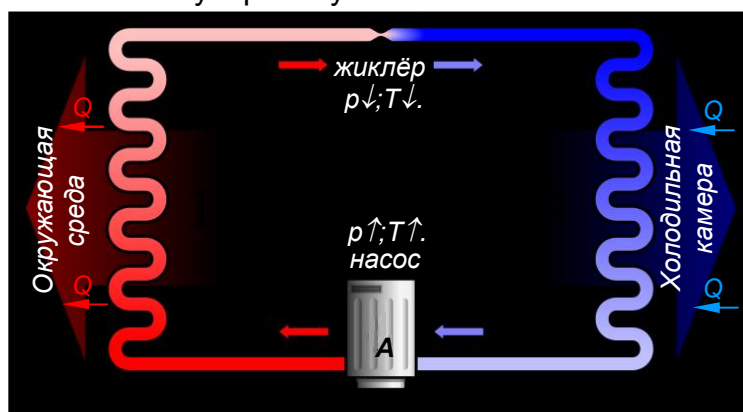


Рис. 16.3. Техническая схема холодильной установки. Насос отсасывает **рабочее тело** (например, фреон) из холодильной камеры и нагнетает его в радиатор, расположенный в окружающей среде. При этом повышается его давление и температура, а количество тепла в холодильной камере уменьшается на величину .. В радиаторе **рабочее тело** охлаждается, отдавая тепло окружающей среде. Далее рабочее тело проходит через жиклёр — весьма малое отверстие, - где оно расширяется, его давление и температура уменьшаются.

Холодильный коэффициент может быть больше 100%, в то время как к. п. д. теплового двигателя всегда значительно меньше 100%.

Холодильные установки применяются очень широко в быту, народном хозяйстве (рис. 17.3), в технике.

5⁰. Холодильная установка — это тепловой насос для «отсоса» тепла из холодильной камеры. Но её можно использовать и для нагнетания тепла — т. е. для отопления. Подумайте, как это сделать.



Рис. 17.3 Бытовой холодильник (а) и рефрижератор — транспортное средство с холодильной установкой для перевозки пищевых продуктов при искусственном охлаждении (б).

НЕОБРАТИМЫЕ ЯВЛЕНИЯ И НЕОБРАТИМОСТЬ ВРЕМЕНИ

1⁰. **Необратимыми называют процессы**, которые самопроизвольно (без внешних воздействий) протекают только в одном направлении. Эти очень важные процессы сопровождаются явлениями диссипации (рассеивания). **Все** реальные процессы необратимы: любая система стремится перейти из менее вероятного, менее устойчивого состояния в более вероятное, более устойчивое, **равновесное** состояние, из которого самостоятельно (без внешнего воздействия) выйти не может. В этом заключается суть второго закона термодинамики (с различными формулировками этого закона вы познакомитесь в будущем).

2⁰. На верхнем рисунке (а) для сравнения изображен график **незатухающих свободных колебаний** маятника, которые **реально не наблюдаемы**, т. к. могли бы происходить лишь при полном отсутствии трения (чего не бывает). Это **идеализированный** пример. Уменьшая трение можно приближаться к незатухающим колебаниям. **Реальные колебания – всегда затухающие** (график (б)). Здесь же показан прибор для записи колебаний (в).

На втором рисунке показаны преобразования механической энергии при колебаниях маятника в воздухе. Она рассеивается, переходит во внутреннюю энергию движения молекул.

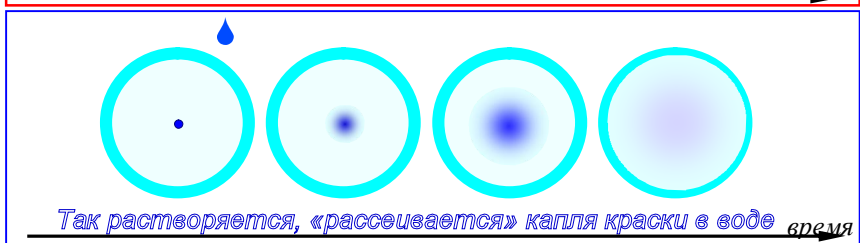
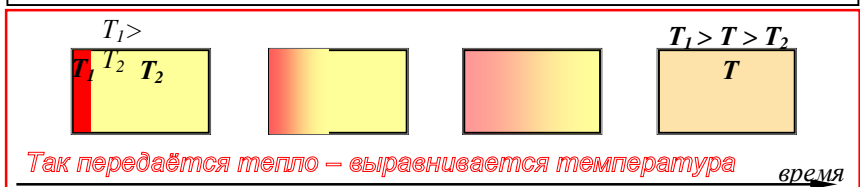
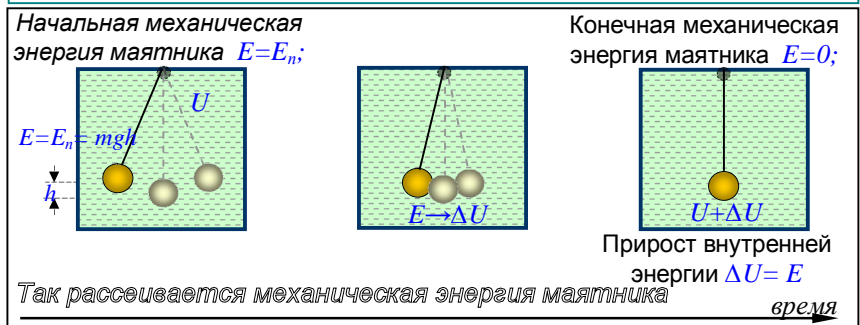
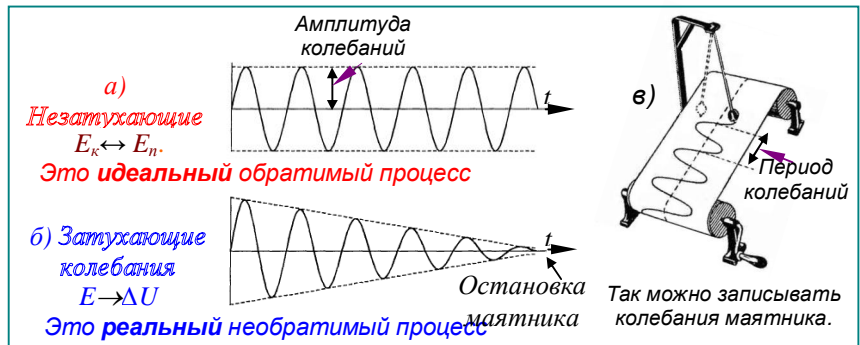
На следующем рисунке показан процесс выравнивания температуры изначально неравномерно нагретого тела за счёт теплопередачи. В результате устанавливается тепловое равновесие.

На последнем рисунке показан процесс растворения капли краски за счёт явления диффузии.

Необратимые явления можно заснять на плёнку. Однако если плёнку запустить с конца, то фильм будет выглядеть неправдоподобно: мы никогда не видели в действительности, чтобы неподвижный маятник сам собой начал раскачиваться. Никогда равномерно нагретое тело само по себе не сможет нагреться с одной стороны и охладиться с другой. Чуть подкрашенная вода сама по себе не станет чистой, а краска не соберётся в каплю.

3⁰. Такие процессы, происходящие вокруг нас, придают времени важное свойство — **направленность**.

Необратимость реальных процессов означает необратимость времени.



КАК ПРЕВРАТИТЬ ЭНЕРГИЮ В РАБОТУ? ВСЕГДА ЛИ ЭТО ВОЗМОЖНО?

1⁰. Человеку нужны машины. Движение машин требует работы. Работа происходит за счет энергии. Значит надо отнять у тела или системы тел энергию – тогда получится работа. Но всегда ли возможно забрать энергию у тела? Оказывается почти вся энергия, имеющаяся вокруг нас, совершенно бесполезна: она не может быть превращена в работу!

Кроме машин, человеку нужно тепло, если холодно, и нужна прохлада в нестерпимую жару. Всегда ли возможно получить тепло или холод? Тут тоже возникают проблемы.

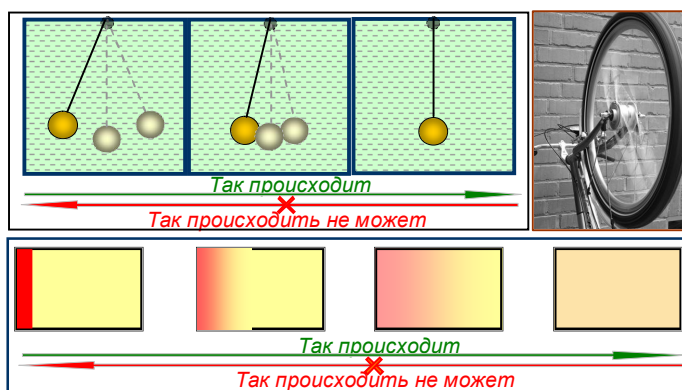
2⁰. Разберёмся в этих явлениях подробнее.

Отклоненный от положения равновесия маятник рано или поздно остановится. Механическая энергия колеблющегося маятника благодаря сопротивлению воздуха и трению в подвесе перейдет в тепло. Однако ни при каких условиях маятник не начнет раскачиваться за счет тепла, имеющегося в окружающей среде.

Запущенное от руки колесо перевернутого велосипеда сделает много оборотов, но, в конце концов, тоже прекратит движение. Нет исключения из важного закона: все окружающие нас тела, движущиеся **самопроизвольно**, в конце концов, остановятся. Они приходят в **равновесное** состояние с окружающей средой. Из равновесного состояния система сама по себе выйти не может.

Вы знаете также, что если имеется тело, у которого одна часть нагрета, а другая холодная, то тепло будет передаваться от нагретой части к холодной до тех пор, пока температуры не уравниваются. Тогда теплопередача прекратится. Установится

тепловое равновесие. Тепло переходит от горячего тела к холодному, но не может самопроизвольно перейти от холодного тела к горячему. Чтобы от менее нагретого тела к более нагретому телу передавать тепло, *нужна работа*. В этом можно убедиться на примерах использования теплового насоса в холодильниках и кондиционерах (см. § 24а).



3⁰. Нет такого явления, при котором тела самостоятельно выходили бы из состояния равновесия – механического, теплового или иного. Не может быть такого случая, чтобы колесо, сидящее на оси, начало бы вращаться само по себе. Не бывает и так, чтобы нагрелся сам по себе лежащий на столе хлеб.

Стремление к равновесию означает, что у событий имеется естественный ход.

Тела самопроизвольно приходят в состояние равновесия, но самопроизвольно выйти из него не могут. Такие равновесные системы физически мертвы. Так утверждает второй закон термодинамики.

Этот закон природы сразу же показывает, какая часть находящейся вокруг нас энергии совершенно бесполезна. К ней относится энергия теплового движения молекул тех тел, которые находятся в состоянии равновесия. Такие тела не способны превратить свою энергию в работу. Они не способны и обмениваться теплом.

Эта часть энергии огромна. Оценим величину этой «мертвой» энергии на примере внутренней энергии Мирового океана.

Если понизить температуру вод Мирового океана (масса которых $\cong 1,4 \cdot 10^{21}$ кг) всего на 1° , то высвободится огромная энергия $1,4 \cdot 10^{21} \cdot 4,2 = 6 \cdot 10^{21}$ кДж. Такую энергию все современные электростанции Мира способны выработать лишь за 100 000 лет!

Какие заманчивые перспективы получения механической энергии за счёт незаметного охлаждения воды в океане! Одна беда – Мировой океан находится в равновесии с окружающей средой и поэтому просто отобрать от него тепло и превратить его в работу невозможно.

4⁰. Не приходится удивляться, что подобного рода расчеты действуют гипнотически на малосведущих изобретателей, несмотря ни на какие законы природы. Мы уже говорили (см. Пособие для 7 кл.) о непрекращающихся попытках построения вечного двигателя – «perpetuum mobile», создающего работу из ничего. Но из закона сохранения энергии следует, что создать такой вечный двигатель невозможно (теперь мы назовем его вечным двигателем *первого рода*).

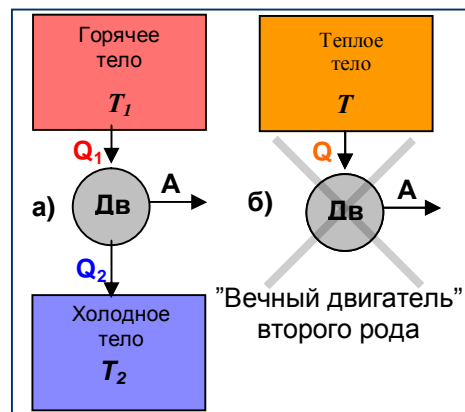
Похожую ошибку совершают и несколько более хитроумные изобретатели, которые пытаются создать конструкции двигателей, производящих работу за счет **одного лишь охлаждения среды**. Этот неосуществимый двигатель называют вечным двигателем *второго рода*. И здесь совершается логическая ошибка, поскольку изобретатель основывается на законах физики, являющихся следствием закона о стремлении всех тел к состоянию равновесия. Среда просто не будет охлаждаться, если нет более холодного тела, способного принять тепло.

Итак, одним лишь отнятием тепла у среды нельзя произвести работу. Другими словами: **система тел, находящихся в равновесии друг с другом, энергетически бесполезна.**

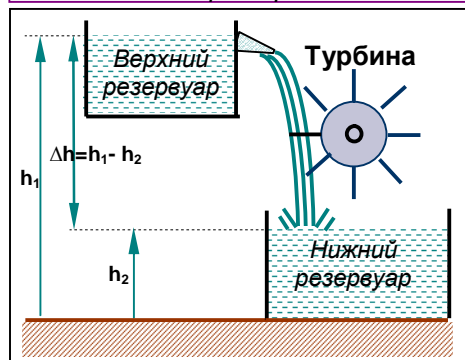
5⁰. Значит, для получения работы необходимо, прежде всего, найти тела, не находящиеся в равновесии со своими соседями. Только тогда можно использовать потенциальную энергию тела, получить работу или осуществить процесс *перехода тепла от одного тела к другому* для превращения части этого тепла в механическую работу.

Создание потока энергии – вот необходимое условие получения работы. На «пути» этого потока возможно превращение энергии в работу.

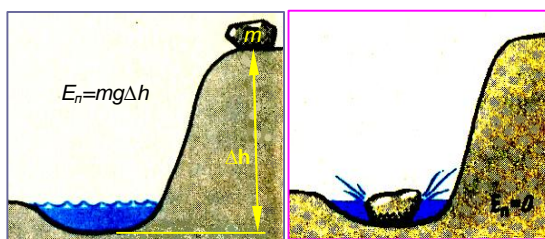
Поэтому к энергетическим запасам, полезным для людей относится энергия лишь тех тел, которые не находятся в равновесии с окружающей средой или легко переводятся в такое состояние. Например, таким свойством обладает топливо при наличии окислителя.



Термодинамические схемы:
а) теплового двигателя;
б) «вечного» теплового двигателя второго рода



Принципиальная схема гидравлической турбины



Камень на берегу обладает потенциальной энергией, которую можно использовать, столкнув его, чтобы он оказался в неравновесном состоянии и стал падать. Тогда к нему можно привязать верёвку и заставить что-нибудь тянуть...



Задание

Внимательно рассмотрите рисунки и объясните изображённые на них явления.

ДОПОЛНЕНИЕ К РАЗДЕЛУ 1

ЕЩЁ КОЕ-ЧТО О ТЕРМОДИНАМИКЕ

«Термодинамика – это единственная физическая теория общего содержания, относительно которой я убеждён, что в рамках применимости её основных понятий она никогда не будет опровергнута»

А. Эйнштейн

1. ЧТО ТАКОЕ СОВРЕМЕННАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

1⁰. Современная термодинамика – удивительная универсальная наука.



Физик, мечтающий овладеть неисчерпаемыми запасами внутренней энергии, должен о выборе пути исследований посоветоваться, прежде всего, с термодинамикой.

То же самое должны сделать и *химик*, старающийся получить новое вещество; и *геолог*, изучающий новое рудное месторождение; и *биолог*, пытающийся разобраться в бесконечной сложности



жизненных процессов, протекающих в живой клетке. Это следует делать и *синоптику*, ищущему наиболее эффективные способы предсказания погоды на основе изменений температуры, атмосферного давления, а также движения воздушных и водных потоков в различных точках земного шара.

Инженер, задумавший создать новый двигатель, прежде подсчитает с помощью термодинамики, какова может быть его эффективность и будет ли он более выгодным, чем существующие.

Если термодинамика даст отрицательный ответ по поводу намеченного направления исследований, работа не может быть успешной.

Паровозы, пароходы, тепловозы, автомобили, самолёты, ракеты и космические корабли невозможно было бы создать без термодинамики.

Термодинамика научила химиков использовать неисчерпаемые в воздушном бассейне земного шара запасы азота. Сегодня во всех странах мира работают гигантские азототуковые химические комбинаты, которые извлекают азот из воздуха и превращают его в удобрения, повышающие урожаи полей.

Огромное количество новых ценнейших материалов создано благодаря термодинамике. Термодинамика помогла найти решение фантастической проблемы синтеза искусственных алмазов, рубинов и других кристаллов. То, что в природе рождалось в течение миллионов лет, в неведомые геологические эпохи, в неведомых глубинах, теперь создается в сверхпрочных аппаратах учёных-химиков. Условия протекания соответствующих химических реакций указала термодинамика.

Астрофизики, используя законы термодинамики, пытаются разобраться в чудовищной, еще совсем недавно казавшейся совершенно недоступной загадочности явлений в недрах далеких миров, внутри звезд, отстоящих от нас на сотни и тысячи световых лет.

Все области знания, в которых успешно используются термодинамические методы исследования, перечислить просто невозможно.

2⁰. В чём же секрет универсальности термодинамики?

Термодинамика возникла в XIX в. в связи с необходимостью совершенствования паровых машин. Впервые С. Карно показал, что это можно сделать, анализируя лишь сам *физический процесс* преобразования тепловой энергии в механическую энергию в паровой машине, не вдаваясь в особенности её конструкции.

Потом этот метод стали использовать не только для тепловых машин, но и для совершенно других макроскопических систем и для любых видов энергии. Он оказался очень удобным, так как требовал минимальных сведений об исследуемой системе и относительно просто позволял получить важную информацию о её свойствах.

Дело в том, что как бы сложно ни было изучаемое явление, к какой бы отрасли познания оно ни относилось – всюду и всегда наиболее важным, существенным, основным оказывается **переход, превращение одного вида энергии в другой вид**. Следя за этими преобразованиями энергии, вычисляя их, термодинамика позволяет предсказать очень многие свойства изучаемого макроскопического объекта (**рис. 1Д**).

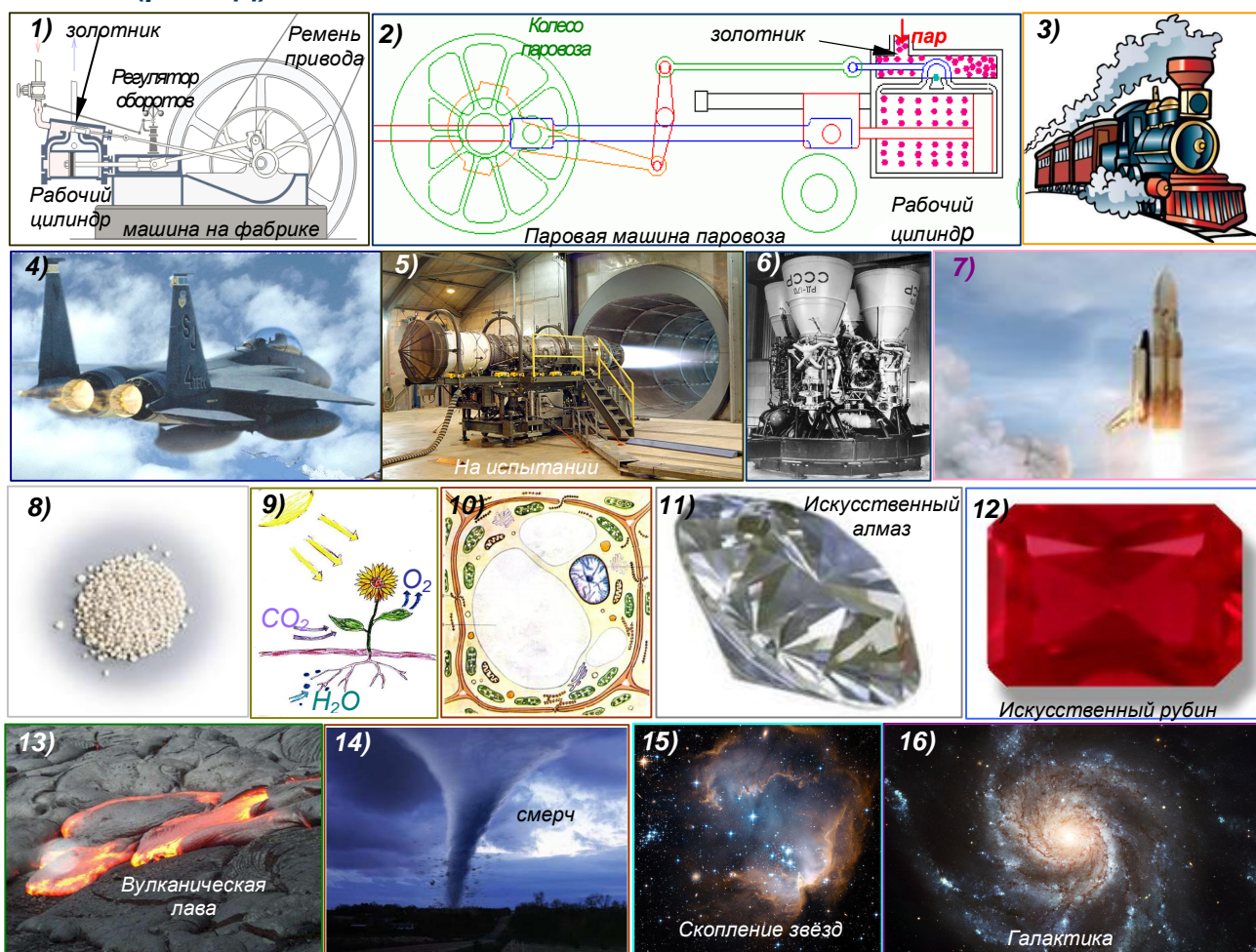


Рис. 1.Д. Чтобы изучать и создать изображенные на этом рисунке объекты, использовались термодинамические методы исследования и расчётов. Людям нужно было научиться получать из теплоты механическую работу. Так появились сначала паровые машины, а затем и двигатели внутреннего сгорания. 1-7 – паровые поршневые, реактивные и ракетные двигатели. Химики-технологи научились производить из азота воздуха азотные удобрения (8). Термодинамика помогла изучить сложные процессы фотосинтеза, происходящие в растениях (9) и таинственные процессы в живой клетке (10). Благодаря термодинамике люди научились получать искусственные алмазы (11) и рубины (12), которые не могут отличить от природных даже ювелиры. Термодинамические методы исследования позволили вулканологам продвинуться в понимании процессов, происходящих в земной коре (13), а синоптикам – в изучении движения потоков воздуха в атмосфере (14). Астрофизики, используя законы термодинамики, сумели понять многое в ещё недавно казавшихся совершенно непостижимыми процессах в звёздных системах, удалённых от нас на сотни и тысячи световых лет (15, 16).

Термодинамика¹ – это наука о превращениях различных видов энергии друг в друга путём передачи теплоты и совершении работы.

¹ «терме» – теплота; «динамик» – работа (или сила как средство совершения работы).

3⁰. Сегодня термодинамика – это стройная наука, в основе которой лежит небольшое число законов, установленных в результате обобщения огромного количества опытных данных². Эти законы подтверждаются также *молекулярно кинетической теорией (МКТ)*.

Термодинамика относится к физическим наукам, но в ней существуют специальные разделы. Например, *техническая термодинамика (физическая теория тепловых машин)*; *химическая термодинамика* и т. п. Это большие самостоятельные дисциплины.

2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ВНЕШНЯЯ СРЕДА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ НИМИ

1⁰. Мир, в котором мы живем, сложен и безграничен. Чтобы разобраться в происходящих в нём явлениях, при исследованиях используют понятия: *термодинамическая система* и *внешняя среда*, а границу между ними (замкнутую поверхность), называют *контрольной поверхностью*, (рис. 2.Д).

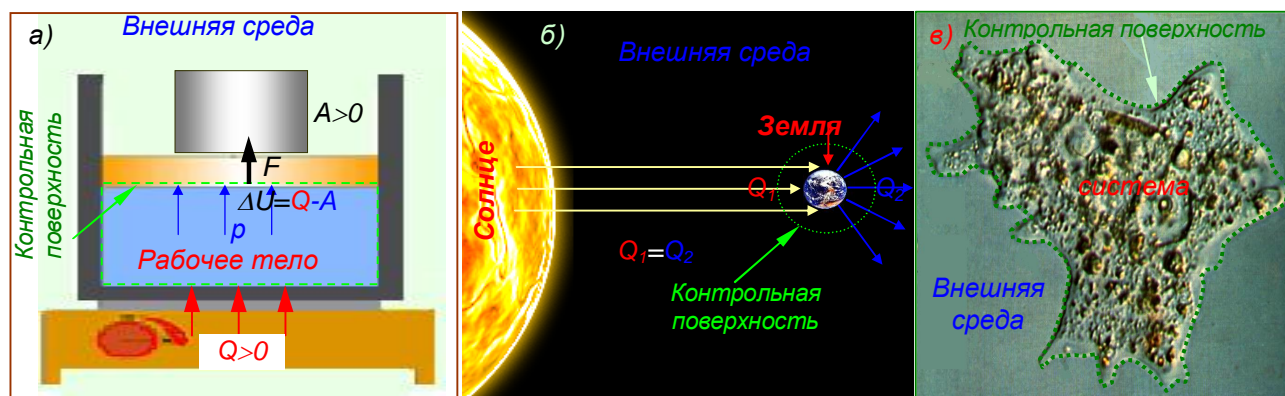


Рис. 2Д. *Термодинамическая система; внешняя среда и контрольная поверхность.* В приведенных примерах это соответственно: а) при исследовании рабочего тела переменного объема: *рабочее тело под поршнем*; *все тела и гравитационное поле Земли*; *элементы поверхности цилиндра и поршня, ограничивающие рабочее тело*; б) при исследовании планеты Земля это: *планета Земля и её атмосфера*; *космические тела и силовые поля за пределами земной атмосферы*; *верхняя граница атмосферы*; в) при исследовании амёбы: *амёба*; *вода, в которой она плавает*; *поверхность амёбы*.

2⁰. *Термодинамическая система* – это совокупность макроскопических объектов (тел и полей), обменивающихся энергией в форме работы и в форме теплоты как друг с другом, так и с внешней средой.

Для синоптика такой системой, например, может быть земная атмосфера.

Для инженера-энергетика – узел тепловой машины.

Для химика – смесь реагирующих веществ в его приборе, где протекают химические превращения.

Ученый-астрофизик назовет системой гигантскую звезду, которую он изучает.

Залив моря – это тоже термодинамическая система для ученых, изучающих солевое равновесия морской воды и впадающей в залив реки.

Перегретый пар под поршнем паровоза, взрывчатая газовая смесь паров горючего с воздухом в цилиндре двигателя автомобиля, пары сверхвысокого давления в котлах тепловой электростанции – все это различные системы, свойства и состояния которых изучаются термодинамикой.

² Эти законы часто называют «*началами*» термодинамики. Они играют в термодинамике ту же роль, что и *постулаты* в геометрии.

Термодинамика позволяет изучать любые *макроскопические* системы, но законы термодинамики *утрачивают смысл для микроскопических* систем, состоящих всего из нескольких молекул.

Макроскопические системы, изучаемые термодинамикой, могут быть очень малыми, как, например, живая клетка (состоящая из колоссального количества молекул), и гигантски большими, как звезда. Но *система*, изучаемая термодинамикой, **не может быть бесконечной**. Она *должна иметь границы*. Это очень важно. Например, выводы термодинамики не применимы ко всей *бесконечной Вселенной*.

Внешняя среда – это внешние тела и силовые поля по отношению к термодинамической системе.

3⁰. **Контрольная поверхность** между термодинамической системой и окружающей средой в ряде случаев может совпадать с некоторой реальной физической поверхностью.

Например, при изучении рабочего тела под поршнем цилиндра или амёбы (рис. 2.Д; а, в).

В других случаях – это условная, воображаемая граница.

Например, при изучении планеты с её атмосферой (рис. 2.Д; б), или самой атмосферы.

На контрольной поверхности происходит **взаимодействие** системы и внешней среды, которое может состоять в переходе энергии (в форме работы или теплообмена) или вещества³ в систему или из неё.

Если всякие взаимодействия системы и окружающей среды через контрольную поверхность исключены, система называется замкнутой или изолированной.

3. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

1⁰. Термодинамика рассматривает энергетические процессы в макроскопических системах, которые с достаточной степенью точности можно считать покоящимися.

Опыт показывает, что **состояние – физические свойства вещества** зависят от его *термодинамических параметров: температуры T , объема V , давления p .*

Эти параметры определяют состояние (свойства) вещества, подобно тому, как в механике положение материальной точки определяется её координатами,

С помощью МКТ можно показать, что они характеризуют свойства *всей совокупности* молекул макроскопического тела. Их можно непосредственно измерить. **Но для отдельных молекул или небольшой их совокупности они не имеют смысла.** Поэтому их и называют **термодинамическими** или **макроскопическими** параметрами.

2⁰. Уравнение, определяющее связь между тремя параметрами состояния p , V , T , называется **уравнением состояния вещества** данной термодинамической системы. Оно записывается в виде функциональной зависимости между ними и в самом общем виде выглядит так:

$$F(p, V, T) = 0$$

Если один из параметров выразить через два других – например, давление p через объём V и температуру T , то это уравнение можно записать иначе:

$$p = p(V, T).$$

Это просто другая форма того же уравнения. Отсюда видно, что если заданы два параметра (например, V и T), то из уравнения состояния мы можем всегда

³ В данном Пособии случаи перехода вещества через контрольную поверхность не рассматриваются, за исключением специально оговорённых примеров (например, *рис.2Г, в, где через контрольную поверхность проходят продукты жизнедеятельности амёбы*).

определить третий (например, p). Поэтому **для определения термодинамического состояния однородного макроскопического тела необходимо и достаточно знать два параметра состояния.**

3⁰. Конкретный вид уравнения состояния нельзя получить при помощи термодинамики. Оно должно быть найдено другим, независимым путем – либо точными измерениями, либо теоретически. Уравнение состояния необходимо термодинамике знать заранее, без него она ничего не может рассчитать.

Например, уравнение состояния *идеального газа*, который состоит из «упругих» молекул – *материальных точек*, расстояния между которыми велики по сравнению с их размерами (поэтому между ними нет ни сил притяжения, ни сил отталкивания) имеет очень простой вид для одного моля⁴:

$$pV/T = \text{const} = R \text{ или } pV = RT,$$

где величина R – так называемая *универсальная газовая постоянная* ($R = 8314$ Дж/град кмоль).

Это уравнение (полученное впервые петербургским профессором Клапейроном) можно вывести теоретически с помощью *МКТ*. Оно хорошо описывает реальные газы при обычных температурах и невысоких давлениях.

Модель *идеального газа* в термодинамике – простейшая. В термодинамике её роль подобна модели *материальной точки* в механике.

Голландский учёный Ван-дер-Ваальс ввёл в это уравнение постоянные коэффициенты a и b , учитывающие взаимное притяжение и собственный объём молекул. Его уравнение имеет такой вид:

$$(p + a/V^2)(V - b) = RT$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса гораздо более точно, чем уравнение Клапейрона, и применимо в значительно более широких пределах при изменении температуры и давления вещества. В пределе, при $a=0$ и $b=0$, оно переходит в уравнение Клапейрона.

Эта, гораздо более сложная модель позволяет качественно и приближённо количественно исследовать переходы из одного агрегатного состояния в другое. В дальнейшем вы познакомитесь с этим подробнее.

Знать уравнения состояния для термодинамики очень важно. Без него она бессильна при всем своем могуществе.

Кроме двух приведенных, было предложено ещё много различных форм уравнений состояния, описывающих поведение различных веществ с возможно большей точностью. Многие из них так сложны, что рассчитывать по ним очень трудно. В таких случаях оказывается проще составить числовые таблицы.

4. О РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЯХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

1⁰. Как было сказано, термодинамическая система может находиться в различных состояниях, отличающихся соответствующими значениями термодинамических параметров – T , V , p и т. д. Но не всегда эти параметры имеют определённые значения.



Рис. 3Д. Это тигель с расплавленным золотом. Различие цвета указывает на различие температур в различных точках тигля.



Рис. 4Д. При быстром сжатии газа в цилиндре перед поршнем давление p и температура T больше, чем в остальном объёме.

⁴ Моль – единица количества вещества, содержащая $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ микрочастиц (молекул, атомов, ионов). Столько атомов содержится в 0,015 кг углерода ¹²C. Используется также (в СИ) в 1000 раз большая величина – киломоль (кмоль). Число $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ называется числом Авогадро – это «относительный масштаб» макро- и микромиров.

Если, например, температура в разных точках тела не одинакова, то телу нельзя приписать определённого значения параметра T . В этом случае состояние тела называется **термически неравновесным**, рис.3Д. См. также Приложение к гл. 3.

Однако если такое тело **изолировать от других тел** и предоставить самому себе, то температура выровняется и примет **одинаковое для всех точек** значение T – тело перейдёт в **равновесное состояние**. Это состояние (и значение T) не изменится до тех пор, пока тело не будет выведено из равновесного состояния **воздействием извне**.

То же самое может иметь место и для других параметров, например, для давления p . Если газ в цилиндре (например, в цилиндре двигателя автомобиля) быстро сжимается поршнем, рис. 4Д, то у поршня образуется газовая «подушка», давление и температура в которой больше, чем в остальном объёме над поршнем. Следовательно, газ в этом случае не может быть охарактеризован определёнными значениями p и T и состояние его оказывается **механически** и термически **неравновесным**. Однако если остановить поршень, то давление и температура в разных точках объёма выровняются и газ перейдёт в **равновесное состояние** с одинаковыми значениями p и T во всех точках.

Итак, **равновесным состоянием системы называется такое состояние, при котором все параметры системы имеют определённые значения, остающиеся при неизменных внешних условиях постоянными сколь угодно долго.**

При равновесном состоянии: $T(x,y,z,t)=const$; $p(x,y,z,t)=const$ и т. д.

2⁰. **Термодинамика занимается исследованием только равновесных состояний.**

Если по координатным осям откладывать значения каких-либо двух параметров (например, V и p), то любое **равновесное состояние** может быть изображено **точкой** на этом графике, например, точкой «1» на рис. 5Д. **Неравновесное состояние** не может быть изображено таким образом, потому что при этом хотя бы один из параметров не будет иметь определённого значения.

Ну а как быть с исследованием **реальных процессов**, которые как мы только что выяснили (см. рис. 3Д; 4Д), не могут протекать в равновесном состоянии? Для этого используется **упрощённая модель: в термодинамике все реальные процессы рассматриваются как совокупность последовательных равновесных состояний**⁵. Такие процессы называются **квазистатическими** (от лат. *quasi* — нечто вроде, как бы). Их можно изображать графически в виде некоторой линии (рис. 5Д).

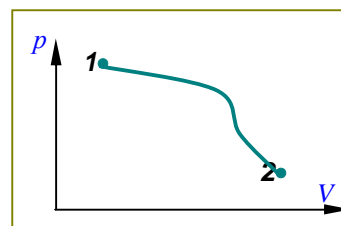


Рис. 5Д. Процесс перехода системы из состояния 1 в состояние 2 изображается линией – как совокупность последовательных равновесных состояний.

Квазистатическим называют идеализированный процесс, при котором в любой момент физическое состояние системы бесконечно мало отличается от равновесного.

Такие процессы не существуют в природе, но являются удобной **идеализированной моделью** для исследования в термодинамике.

Помните, как в далёкие античные времена движение рассматривалось как **совокупность ряда «положений, из которых каждое отдельно взятое есть покой»** (Зеноном V в. до н. э)? Об этом писал и А. С. Пушкин в стихотворении «Движение»: «*Движения нет, сказал мудрец брадатый,...*» (см. конец §13.1 из курса 7 кл.). Не правда ли странно, не корректно для современной физики?! Ведь всякий процесс, т. е. переход из одного состояния в другое, связан с нарушением равновесия системы. Да, но зато просто и выводы теории удовлетворительно согласуются с опытом!



⁵ В связи с этим **термодинамику** следовало бы называть **термостатикой**. Но то, что сложилось исторически, решили не менять.

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ (ПОВТОРЕНИЕ)

КРОССВОРДЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ



№1 КРОССВОРД ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ ГЛАВЫ 1 «ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И СПОСОБЫ ЕЁ ИЗМЕНЕНИЯ»

Полная энергия макроскопического тела E

Механическая энергия E движения тела и его взаимодействия с другими телами

Внутренняя энергия U всех движущихся и взаимодействующих микрочастиц тела.

Кинетическая энергия E_k движущегося тела.

Потенциальная энергия E_p взаимодействия тела с другими телами

Кинетическая энергия всех движущихся молекул U_k .

Потенциальная энергия U_p взаимодействия всех молекул

Энергия покоя U_0 молекул тела – внутримолекулярная энергия.

Clues:

- 1. $E = E_p + E_k + U = E + U$
- 2. $Q = 1 \text{ ккал}$
- 3. t_1 $m_1 = 1 \text{ л}$ \rightarrow $t_2 + 1^\circ\text{C}$ $m_2 = 1 \text{ л}$ (Вода)
- 4. P -? или T -?
- 5. $Q = \Delta U + A$
- 6. $Q = \Delta U + A$
- 7. $Q = \Delta U + A$
- 8. $Q = \Delta U + A$
- 9. $Q = \Delta U + A$
- 10. $Q = \Delta U + A$
- 11. $Q = \Delta U + A$
- 12. $Q = \Delta U + A$
- 13. $Q = \Delta U + A$
- 14. $Q = \Delta U + A$
- 15. $Q = \Delta U + A$
- 16. $Q = \Delta U + A$
- 17. $Q = \Delta U + A$
- 18. $Q = \Delta U + A$
- 19. $Q = \Delta U + A$
- 20. $Q = \Delta U + A$
- 21. $Q = \Delta U + A$

Additional Clues and Images:

- 10. $\Delta U \rightarrow E_k$
- 12. $\Delta U \rightarrow A$
- 13. $\Delta U \rightarrow E$
- 14. $Q = \Delta U + A$
- 16. $Q = \Delta U + A$
- 17. $Q = \Delta U + A$
- 18. $Q = \Delta U + A$
- 19. $Q = \Delta U + A$
- 20. $Q = \Delta U + A$
- 21. $Q = \Delta U + A$

По горизонтали:

1. Название теплоёмкости 1 кг вещества.
2. Количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г воды на 1°C .
3. Фамилия учёного, открывшего беспорядочное непрерывное движение мелких частичек в жидкостях и газах.
4. Тела, наиболее активно участвующие в процессах лучистого теплообмена (цвет).
5. Физическая величина, являющаяся мерой средней кинетической энергии молекул тела.
6. Способ передачи энергии без совершения работы.
7. Тела, имеющие одинаковую температуру, находятся в тепловом.....
8. Название температурной шкалы, соответствующее представлению о температуре, как мере движения молекул вещества.
9. Прибор для измерения температуры.
10. Способ передачи тепла, не требующий участия вещества.
11. Название непрерывного хаотического движение молекул любого вещества.
12. Английский учёные, который изобрёл теплоизолирующий сосуд.
13. Состояние вещества, при котором оно стремится занять как можно больший объём.
14. Теплообмен, при котором энергия переносится струями газа или жидкости.
15. Фамилия учёного, предложившего абсолютную температурную шкалу.
16. Состояние вещества, при котором тела сохраняют свою форму.
17. Химические реакции, протекающие с выделением тепла, называются.... термическими.
18. Энергия, которую получает или теряет тело при теплопередаче.
19. То, из чего состоят все макроскопические тела.
20. Опорные точки при разметке шкалы измерительных приборов, в частности, термометра.
21. Физическая величина, численно равная количеству тепла, которое необходимо для изменения его температуры на 1°C .

По вертикали:

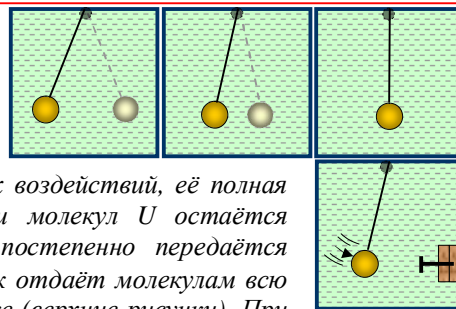
1. Единица измерения температуры (в переводе с лат. – шаг, ступень).
2. Количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г воды на 1°C .
3. Какое тело меньше подвержено лучистому теплообмену – чёрное или белое?
4. Разметка шкалы термометра.
5. Предшественник термометра.
6. Состояние вещества, при котором оно принимает форму сосуда.
7. Сосуд для хранения при неизменной температуре помещённых в него пищевых продуктов.
8. Фамилия учёного, экспериментально доказавшего эквивалентность теплоты и работы.
9. Теплообмен, при котором происходит непосредственная передача энергии от частиц более нагретой части тела к частицам менее нагретой части.
10. Изменение внутренней энергии путём трения, ударов и т. п.
11. Немецкий врач, открывший закон сохранения и превращения энергии.
12. Шведский ученый, предложивший использовать стоградусную шкалу температур
13. Название энергии, связанной с движением и взаимодействием микрочастиц тела.
14. Физическая величина, показывающая, какое количество теплоты выделяется при сгорании топлива массой 1 кг.

КОЛЕБАНИЯ МАЯТНИКА В ВОЗДУХЕ

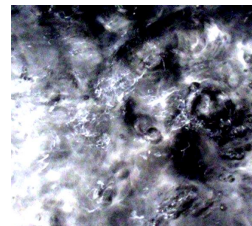
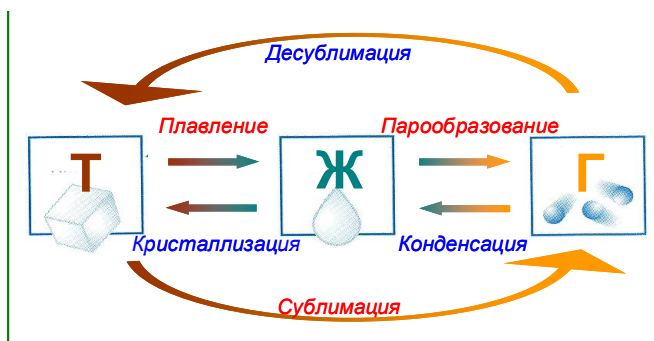
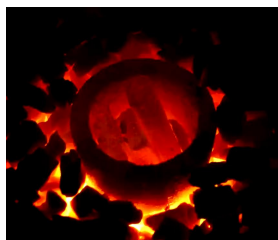
При отсутствии воздуха колебания маятника продолжались бы бесконечно долго без изменения амплитуды (при отсутствии трения в точке подвеса). В реальности всё **сложнее**. Молекулы воздуха постоянно сталкиваются с гирей маятника, обмениваясь с ней энергией. Если система «маятник – воздух» изолирована от внешних воздействий, её полная энергия сохраняется: сумма механической энергии маятника E и молекул U остаётся постоянной ($E + U = \text{const}$). Энергия движущегося маятника постепенно передаётся молекулам и распределяется, рассеивается между ними. Так маятник отдаёт молекулам всю свою механическую энергию и останавливается в самой нижней точке (верхние рисунки). При этом температура увеличивается. Система приходит в **равновесное состояние**.

В начальный момент энергия массивного маятника велика. Ею можно воспользоваться, например, для забивания гвоздя (нижний рис.). Но после остановки маятника его энергия распределяется между молекулами и ею уже не воспользоваться для выполнения полезной работы. В этом смысле говорят, что **энергия уравновешенной системы обесценивается**.

Замечание. Обратите внимание, что если бы масса маятника была очень мала, он никогда бы не остановился полностью, так как оказался бы просто броуновской частицей, совершающей хаотическое тепловое движение. Иногда это и происходит со стрелками чувствительных приборов.



№2 Кроссворд для повторения главы 2 «ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА»



1 $Q_{пл} = L m$

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

338

339

340

341

342

343

344

345

346

347

348

349

350

351

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

371

372

373

374

375

376

377

378

379

380

381

382

383

384

385

386

387

388

389

390

391

392

393

394

395

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

429

430

431

432

433

434

435

436

437

438

439

440

441

442

443

444

445

446

447

448

449

450

451

452

453

454

455

456

457

458

459

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480

481

482

483

484

485

486

487

488

489

490

491

492

493

494

495

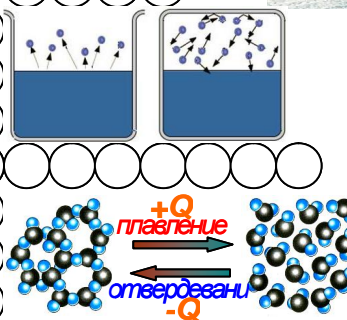
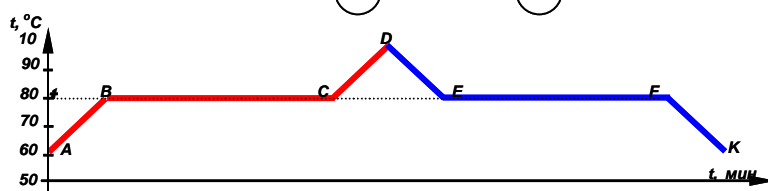
496

497

498

499

500



$Q = \lambda m$

По горизонтали:

1. Количество теплоты необходимое, для превращения данного количества жидкости при температуре кипения в пар без изменения температуры (*mL*).
2. Сконденсированный водяной пар (расплавленный лёд).
3. Газообразное состояние воды.
4. Прочная герметичная кастрюля с предохранительным клапаном для приготовления пищи.
5. Прибор для определения влажности воздуха (конденсационный, волосяной).
6. Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью.
7. Отвердевание кристаллического тела.
8. Тело, размягчение и превращение в жидкость которого при повышении температуры, а также отвердевание при понижении температуры происходят постепенно.
9. Водяной пар в небе.
10. Процесс парообразования с поверхности жидкости.
11. Переход вещества из газообразного состояния в твёрдое (минуя жидкое).
12. Состояние вещества, при котором оно не имеет форму и стремится занять возможно больший объём.
13. Пар, не находящийся в равновесии со своей жидкостью.
14. Переход вещества из твёрдого состояние в газообразное (минуя жидкое).
15. Переход вещества из твёрдого состояние в газообразное (второе название).
16. Количество теплоты необходимое, для превращения данного количества твёрдого вещества в жидкость при температуре плавления без изменения температуры (*mL*).

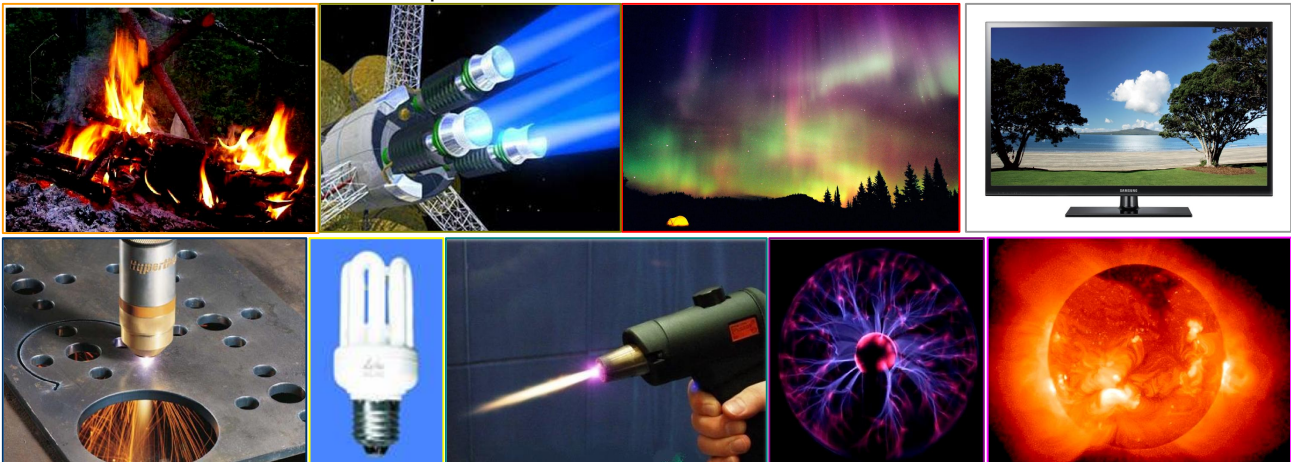
По вертикали:

1. Кристаллическое состояние воды.
2. Температура, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным.
3. Явление превращения жидкости в пар.
4. Переход вещества из твёрдого состояния в жидкое.
5. Реальный газ, находящийся в состоянии, близком к состоянию перехода его в жидкость.
6. Интенсивный переход жидкости в пар, сопровождающийся образованием пузырьков пара по всему объёму жидкости при определённых температуре и давлении.
7. Сконденсированные крупные капли воды в воздухе..
8. Прибор для определения влажности воздуха из двух термометров..
9. Переход жидкости в твёрдое состояние.
10. Сконденсированная влага на поверхности, температура которой ниже точки росы..
11. Ледяные кристаллы, образующиеся на поверхности предметов в холодные ясные ночи.
12. Переход вещества из газообразного состояния в жидкое состояние.

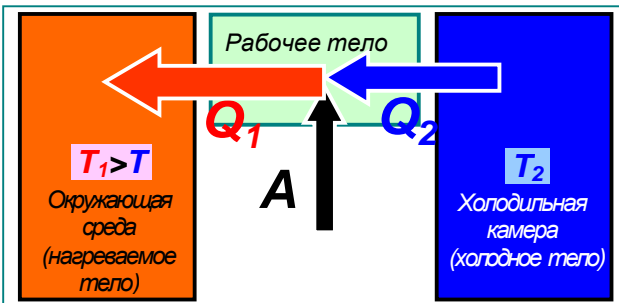
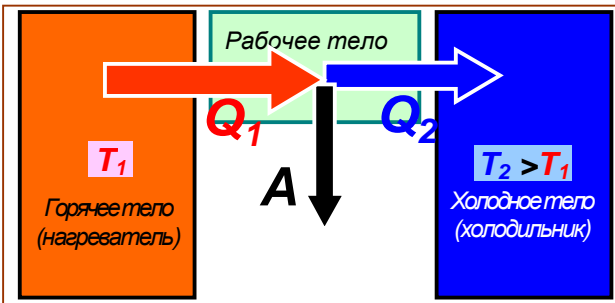
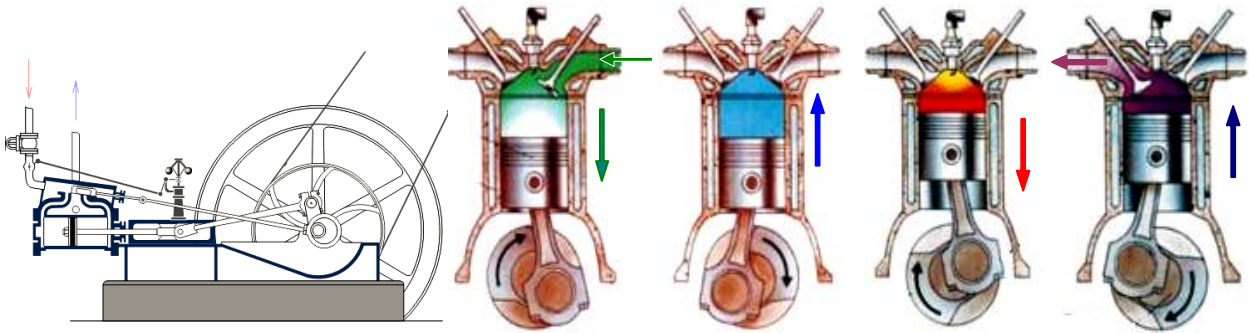
ЧЕТВЁРТОЕ АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА – ПЛАЗМА

При нагревании любое вещество испаряется, превращаясь в газ. Если увеличивать температуру и дальше, молекулы газа начнут распадаться на атомы, которые затем превращаются в ионы. Возникает особое, *четвёртое* агрегатное состояние вещества – *плазма* (от греч. *plasma* – вылепленное, оформленное) – *газообразная смесь ионов, в целом нейтральная*. Отличие свойств плазмы от свойств обычных газов обусловлено особенностями взаимодействия ионов.

В плазменном состоянии находится почти вся Вселенная. Это самое распространённое агрегатное состояние вещества. Из него состоят звёзды и межзвездная среда, ионосфера Земли... Плазма – это северное сияние и источник света газоразрядных ламп (ламп дневного света). Это то, что мы видим на экранах плазменных телевизоров. Плазма образуется при горении и взрывах; при электрических разрядах... Она применяется в газовых лазерах. Существует плазменное бурение, резка металлов. Плазменный двигатель весьма перспективен для дальних космических полётов...



№3 Кроссворд для повторения главы 3 «ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ»



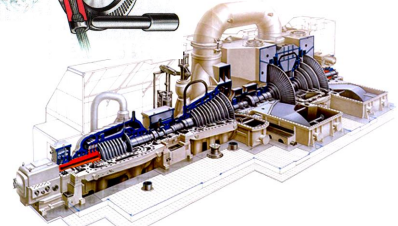
$$\text{КПД}_T = (Q_1 - Q_2 / Q_1)$$

$$k = Q_2 / A = Q_2 / (Q_1 - Q_2)$$

A crossword puzzle grid with various images and icons placed within it. The grid contains 16 numbered circles (1-16) corresponding to the clues. The images include:

- 1: Piston and crank mechanism.
- 2: A small engine component.
- 3: A steam engine.
- 4: A steam boiler.
- 5: A battery.
- 6: A steam engine.
- 7: A steam engine.
- 8: A steam engine.
- 9: A steam engine.
- 10: A steam engine.
- 11: A steam engine.
- 12: A steam engine.
- 13: A steam engine.
- 14: A steam engine.
- 15: A battery.
- 16: A steam engine.

$$F(V, p, T)=0; \quad pV=RT; \quad (p + \frac{a}{v^2}) \cdot (v-b) - RT=0.$$



По горизонтали:

1. Тело, сообщающее рассматриваемой термодинамической системе энергию в форме тепла.
2. Процесс подвода тепла в двигателе с использованием топлива.
3. Название поверхности, отделяющей термодинамическую систему от окружающей среды.
4. Такт (3) двигателя внутреннего сгорания, при котором на поршень действует давление рабочего тела, передавая энергию валу двигателя в форме механической работы.
5. Термодинамический параметр состояния рабочего тела, характеризующий силовое воздействие,
6. Устройство, преобразующее тепловую энергию в механическую работу или механическую работу для увеличения разности температур.
7. Термодинамический параметр состояния рабочего тела, характеризующий расстояния между его молекулами.
8. Двигатель с чисто вращательным движением рабочего органа — ротора преобразующий в механическую работу кинетическую энергию подводимого рабочего тела — пара, газа или воды.
9. Машины (двигатели, компрессоры и т. п.), использующие поршни.
10. Процесс, в результате которого система возвращается в своё исходное состояние.
11. Такт (1) двигателя внутреннего сгорания, при котором происходит заполнение цилиндра.
12. Изобретатель четырёхтактного ДВС.
13. Изобретатель сопла, позволяющего получить очень большую, сверхзвуковую скорость потока газа и пара, применяемого в турбинах, ракетах и т. п.
14. Уравнение, связи термодинамических параметров (T , p , V), определяющих состояние вещества.

По вертикали:

1. Такт (4) двигателя внутреннего сгорания, во время которого происходит удаление рабочего тела из цилиндра.
2. Русский теплотехник, один из изобретателей теплового двигателя, создатель первой в России паросиловой установки.
3. Часть поршневого двигателя.
4. Деталь двигателя между поршнем и кривошипом..
5. Английский изобретатель универсальной паровой машины.
6. Двигатель, в котором тепловая энергия преобразуется в механическую работу..
7. Такт (2) двигателя внутреннего сгорания, при котором затрачивается работа на сжатие рабочего тела.
8. Французский физик, один из основателей термодинамики.
9. Устройство для сжатия и подачи газов под давлением.
10. Рычаг, служащий для приведения вала машины во вращательное движение.
11. Массивная круглая деталь, устанавливаемая на ведущем валу машины для уменьшения неравномерности его вращения.
12. Подвижная деталь поршневой машины, перекрывающая поперечное сечение её цилиндра и перемещающаяся в направлении его оси.
13. Тело, получающее от рассматриваемой термодинамической системы энергию в форме тепла
14. Реактивный двигатель, источник энергии и рабочее тело которого находится в самом средстве передвижения.
15. Изобретатель ДВС, в котором воспламенение топлива происходит от сжатия воздуха.
16. Наука о преобразованиях энергии, возникшая в связи с совершенствованием паровых машин.

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ РАБОТА ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПОРШНЯ

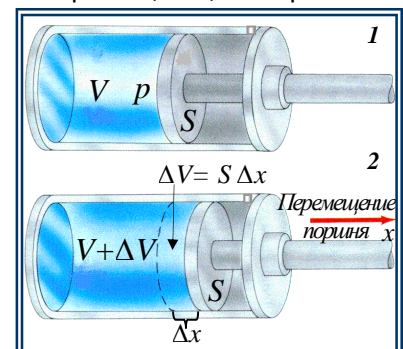
Рассчитаем работу, совершаемую газом, имеющим давление p , и перемещающим поршень в цилиндре на величину Δx . Вы знаете, что работа ΔA силы F , действующей в направлении перемещения Δx , равна: $\Delta A = F \cdot \Delta x$.

Если p – давление в цилиндре, то сила F , действующая на поршень, площадь которого S , равна: $F = p \cdot S$,

Подставляя это значение силы в первую формулу, и учитывая, что при перемещении поршня на величину Δx объём V под поршнем возрастает на величину $\Delta V = S \cdot \Delta x$ (см. рис.), получим искомое выражение для элементарной работы ΔA совершенной силой F , действующей на поршень:

$$\Delta A = F \cdot \Delta x = p \cdot S \cdot \Delta x = p \cdot \Delta V.$$

Такой формулой выражается элементарная работа ΔA , совершаемая не только газом или паром, но и любым рабочим телом.





РЕШЕНИЯ КРОССВОРДОВ



Кроссворд №1

По горизонтали: 1. удельная; 2. калория; 3. Броун; 4. чёрные; 5. температура; 6. теплообмен; 7. равновесие; 8. абсолютная; 9. термометр; 10. излучение; 11. тепловое; 12. Дьюар; 13. газообразное; 14. конвекция; 15. Кельвин; 16. твёрдое; 17. экзо; 18. количество теплоты; 19. микрочастицы; 20. реперные; 21. теплоёмкость.

По вертикали: 1. градус; 2. белое; 3. макроскопическое; 4. градуирование; 5. термоскоп; 6. жидкое; 7. термос; 8. Джоуль; 9. теплопроводность; 10. работа; 11. Майер; 12. Цельсий; 13. внутренняя; 14. удельная теплота сгорания.

Кроссворд №2

По горизонтали: 1. теплота парообразования; 2. вода; 3. пар; 4. сковарка; 5. гигрометр; 6. насыщенный; 7. кристаллизация; 8. аморфное; 9. облака; 10. испарение; 11. десублимация; 12. газ; 13. ненасыщенный; 14. сублимация; 15. возгонка; 16. теплота плавления.

По вертикали: 1. снег; 2. точка росы; 3. парообразование; 4. плавление; 5. пар; 6. кипение; 7. дождь; 8. психрометр; 9. отвердевание; 10. роса; 11. иней; 12. конденсация

Кроссворд №3

Горизонтали: 1. нагреватель; 2. сгорание; 3. контрольная; 4. рабочий ход; 5. давление; 6. тепловые машины; 7. объём; 8. турбина; 9. поршневые машины; 10. цикл; 11. впуск; 12. Отто; 13. Лаваль; 14. Уравнение состояния.

Вертикали: 1. выпуск; 2. Ползунов; 3. цилиндр; 4. шатун; 5. Уатт; 6. тепловые двигатели; 7. сжатие; 8. Карно; 9. компрессор; 10. кривошип; 11. маховик; 12. поршень; 13. холодильник; 14. ракетный; 15. Дизель; 16. термодинамика.

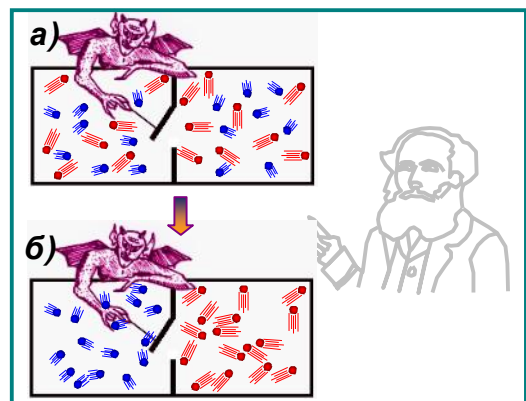


ЧТО ТАКОЕ ДЕМОН МАКСВЕЛЛА?

Демон Максвелла — это гипотетическое разумное существо микроскопического размера, придуманное Джеймсом Максвеллом в его мысленном эксперименте (1867 г) с целью проиллюстрировать кажущийся парадокс второго начала термодинамики.

Мысленный эксперимент Максвелла состоит в следующем: предположим, сосуд с газом разделён непроницаемой перегородкой на две части: правую и левую. В перегородке отверстие с устройством (так называемый демон Максвелла), которое позволяет пролетать **быстрым** (горячим) молекулам газа только из левой части сосуда в правую, а **медленным** (холодным) молекулам — только из правой части сосуда в левую. Тогда, через некоторый промежуток времени, "горячие" (быстрые) молекулы окажутся в правом сосуде, а "холодные" — останутся в левом.

Таким образом, получается, что демон Максвелла позволяет нагреть правую часть сосуда и охладить левую без дополнительного



Демон выпускает из левой половины сосуда в правую половину быстрые молекулы и закрывает отверстие перед медленными молекулами

подвода энергии к системе.

Другими словами, равновесная система (а) превращается в неравновесную систему (б) без затрат работы. Возникнет перепад температур ΔT , образуются горячее и холодное тела – что, как вам известно, достаточно для получения работы с помощью обычного теплового двигателя. Итак, микроскопический демон позволяет получить, таким образом, даровую работу, что противоречит второму началу термодинамики.



*Если меня
изготовить из
молекул,
получится
броуновская
частица.*

Но можно ли изготовить такое микроскопическое устройство? Ведь любой микроскопический объект даже из большого числа молекул, помещённый в газ или жидкость, является лишь броуновской частицей, которая будет сама хаотически двигаться под ударами окружающих молекул. Демон не сможет управлять заслонкой, т. к. оба они будут участвовать в броуновском движении!

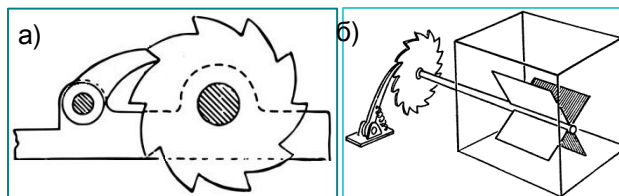
Парадокс разрешается, если рассмотреть замкнутую систему, включающую в себя демона Максвелла и сосуд. Для функционирования демона Максвелла (не микроскопического) необходима передача ему энергии от стороннего источника. За счёт этой энергии и производится разделение горячих и холодных молекул в сосуде.

Итак, демон Максвелла на поверку оказывается макроскопическим слоном в посудной лавке микромира, который живет по собственным законам (см. Пособие 7 кл. §5; Отличается ли «маленькое» от «большого»).

А ВОТ ЕЩЁ ЧТО-ТО ВРОДЕ ДЕМОНА МАКСВЕЛЛА

Представьте себе устройство, которое может работать лишь в одном направлении, например, храповое колесо, т. е. зубчатое колесо, у которого ведущая кромка всех зубцов обрывается очень круто, а задняя полого опускается.

Оно насажено на вал, и к нему пружиной (рис.) прижимается маленькая защелка (собачка), сидящая на своей собственной оси. Такое колесо может крутиться лишь в одну сторону. Если попытаться повернуть его обратно, собачка упрётся в прямой срез зубца и не пустит его. При повороте же колеса в прямом направлении она перескакивает с зубца на зубец.



Храповик (а) и крыльчатка с храповиком (б).

Такие храповики используются в часах, в том числе и в наручных. При заводе часов они позволяют вам закручивать пружину и не дают ей потом раскручиваться.

Такой механизм полностью необратим в том смысле, что колесо не может вращаться в обратную сторону. Насадим на него лопасти. Хаотически движущиеся молекулы окружающего воздуха непрерывно обстреливают лопасти, толкая их то в одну, то в другую сторону. Но когда лопасти пытаются повернуться в одну сторону, им не дает это сделать собачка, а когда они пытаются повернуться в другую, этому ничто не мешает. Так что наше колесо, казалось бы, должно вращаться, и у нас получится что-то вроде вечного двигателя. К сожалению и тут ничего не получится. Если механизм имеет макроскопические размеры, то хаотические воздействия молекул уравниваются, а крыльчатка не двигается. Если же его уменьшить до размеров броуновской частицы, он и все его детали (в том числе и пружинка) просто в неё превратятся. Всё придёт в хаотическое тепловое движение.

