2.2 ТЕРМОДИНАМИКА

Термодинамика – наука о наиболее общих свойствах **макросистем**, касающихся тепловых явлений.

Термодинамический метод исследования состоит в изучении характеристик, описывающих данную макросистему в целом, на основе фундаментальных законов (начал) термодинамики.

В отличие от молекулярной физики в термодинамике не рассматривается внутреннее строение вещества, тепловое движение и взаимодействие молекул, а устанавливаются связи между экспериментально определяемыми величинами, которые называют **термодинамическими параметрами** макросистемы. Например, термодинамическими параметрами состояния идеального газа в термодинамике являются: давление p, объем V, температура T.

Молекулярная физика и термодинамика изучают одни и те же объекты – макросистемы, используя различные методы, и поэтому взаимно дополняют друг друга.

Равновесное состояние термодинамической системы – состояние, при котором термодинамические параметры системы не изменяются со временем.

Термодинамический процесс – переход системы из одного термодинамического состояния в другое.

Нарушение термодинамического равновесия возникает в результате внешних воздействий. Если систему вывести из равновесного состояния, а затем предоставить самой себе, то она постепенно вернется в то же самое состояние или перейдет в новое равновесное состояние.

Релаксация – процесс перехода системы из неравновесного состояния в равновесное при неизменных внешних условиях.

Всякий процесс связан с нарушением термодинамического равновесия, и поэтому представляет собой последовательность неравновесных состояний. Такие процессы называют **неравновесными**. Однако в теоретических исследованиях оказалось полезным рассматривать идеализированные равновесные процессы.

Равновесный процесс – термодинамический процесс, при котором система проходит через непрерывный ряд равновесных состояний.

Равновесным может быть только бесконечно медленный процесс, чтобы при каждом изменении состояния успевала пройти релаксация. Поэтому равновесные процессы называют также **квазистатическими**.

Равновесное состояние изображается на диаграммах точкой, а равновесный процесс – линией (рис. 2.6*а*).

Круговой процесс (цикл) – термодинамический процесс, при котором система после ряда изменений возвращается в исходное состояние (рис. 2.6*б*).

а) переход системы из состояния 1 *в состояние* 2

б) круговой процесс (цикл)

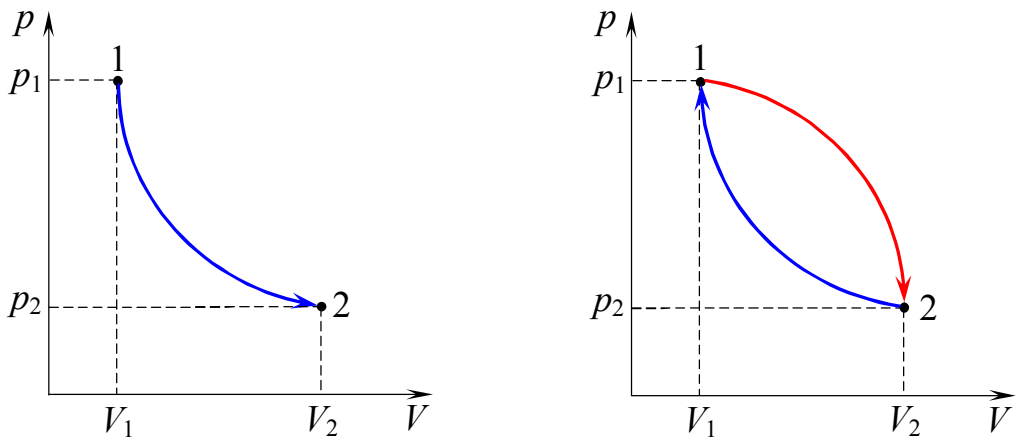

Рис. 2.6. *p*-*V*-диаграммы термодинамических процессов

2.2.1 Внутренняя энергия

Внутренняя энергия U – часть энергии системы, которая зависит от её термодинамического состояния.

Внутренняя энергия складывается из кинетической энергии теплового движения и потенциальной энергии взаимодействия всех частиц системы.

Во внутреннюю энергию системы не входят: кинетическая энергия движения системы как целого и потенциальная энергия системы во внешних силовых полях.

При рассмотрении идеального газа пренебрегают взаимодействием между молекулами, поэтому **внутренняя энергия идеального газа определяется только кинетической энергией теплового движения его молекул**.

Внутренняя энергия идеального газа пропорциональна его абсолютной температуре:

$$U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}RT\,. \qquad (2.22)$$

Величину i называют **числом степеней свободы** молекулы. Она зависит от сложности молекул данного идеального газа. В случае самого простого одноатомного идеального газа $i = 3$.

Внутренняя энергия **одноатомного** идеального газа:

$$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT\,. \qquad (2.23)$$

Если газ состоит из более сложных молекул, то $i > 3$. Это объясняется тем, что сложные молекулы не только движутся поступательно, но также вращаются, и их атомы колеблются относительно друг друга.

Изменение ΔU внутренней энергии идеального газа определяется температурами начального T_1 и конечного T_2 состояний газа:

$$\Delta U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}R(T_2 - T_1)\,. \qquad (2.24)$$

Величина ΔU пропорциональна изменению температуры $\Delta T = (T_2 - T_1)$ идеального газа.

В тех случаях, когда потенциальной энергией взаимодействия молекул пренебречь нельзя, в термодинамике используют модель **реального газа**.

Внутренняя энергия реального газа зависит не только от температуры, но и от занимаемого газом объема.

2.2.2 Тепловое равновесие

Тепловое равновесие – такое состояние макросистемы, при котором все её термодинамические параметры остаются неизменными сколь угодно долго.

В частности при тепловом равновесии неизменными остаются объём, давление, температура макросистемы; отсутствуют фазовые переходы тел, входящих в состав макросистемы, и т.д.

При тепловом равновесии молекулы макросистемы продолжают совершать тепловое движение, интенсивность которого характеризуется температурой макросистемы.

Температура характеризует состояние теплового равновесия макросистемы.

При тепловом равновесии все тела, входящие в состав данной макросистемы, имеют одну и ту же температуру.

Другие параметры макросистемы могут иметь, хотя и постоянные, но различные значения. Например, давление газа в закрытом сосуде может быть больше или меньше давления воздуха в лаборатории. Но температура воздуха в лаборатории и температура газа в сосуде при тепловом равновесии одинаковы.

2.2.3 Теплопередача

Теплопередача (теплообмен) – самопроизвольный необратимый процесс изменения внутренней энергии тела без совершения над ним механической работы.

Теплопередача всегда происходит в определённом направлении: от более нагретого тела к менее нагретому. При этом приращение внутренней энергии менее нагретого тела за любой промежуток времени равно убыли за тот же промежуток времени внутренней энергии более нагретого тела. Данный факт является частным случаем закона сохранения энергии.

Теплопередача прекращается, когда температуры тел выравниваются, т.е. наступает тепловое равновесие.

Способы теплопередачи: теплопроводность, конвекция, излучение.

Теплопроводность – теплопередача от одного тела к другому при их непосредственном контакте. В частности за счёт теплопроводности может происходить теплопередача от более нагретой части к менее нагретой части одного и того же тела. Различные тела обладают различной теплопроводностью. Теплопроводность не сопровождается переносом вещества.

Конвекция – теплопередача, осуществляемая потоками жидкости или газа. Различают естественную (свободную) и вынужденную конвекции. Естественная конвекция возникает при нагревании нижних слоёв жидкости или газа. Вынужденную конвекцию осуществляют путём перемешивания жидкости или газа с помощью приспособлений и устройств.

Излучение (тепловое излучение) – электромагнитное излучение, испускаемое телами за счёт их внутренней энергии. Тепловое излучение испускают все тела. Мощность излучения данного тела пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры. Так что, чем более нагрето тело, тем более мощным источником теплового излучения оно является. Все тела также частично поглощают, частично отражают падающее на них излучение. За счёт испускания и поглощения теплового излучения между телами происходит теплообмен.

2.2.4 Количество теплоты. Удельная теплоемкость вещества

При теплообмене внутренняя энергия более нагретых тел уменьшается, а менее нагретых тел увеличивается. Количество теплоты – количественная мера изменения внутренней энергии тела, участвующего в теплообмене.

Количество теплоты Q – физическая величина, численно равная количеству энергии, переданной данному телу в процессе теплообмена.

Если данное тело передает другим телам количество теплоты Q', то можно считать, что данному телу передано отрицательное количество теплоты $Q = -Q'$.

По определению количество теплоты измеряется в тех же единицах, что и энергия. Единица количества теплоты в СИ – ***джоуль***: [Q] = 1 Дж.

Количество теплоты Q, необходимое для нагревания однородного тела от начальной температуры T_1 до конечной температуры T_2, пропорционально массе m тела и разности $\Delta T = T_2 - T_1$ температур:

$$Q = cm\Delta T. \qquad (2.25)$$

Формула (2.25) справедлива и при нагревании, и при охлаждении тела. Если тело нагревается ($T_2 > T_1$), то $Q > 0$, тело получает количество теплоты Q. Если тело охлаждается ($T_2 < T_1$), то $Q < 0$, тело отдаёт количество теплоты $Q' = -Q$.

Коэффициент пропорциональности c называют удельной теплоёмкостью вещества, из которого изготовлено однородное тело.

Удельная теплоёмкость – физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое получает или отдаёт вещество массой 1 кг при изменении его температуры на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}. \qquad (2.26)$$

Единица удельной теплоёмкости в СИ – ***джоуль на килограмм-кельвин***: [c] = 1 Дж/(кг·К).

На практике часто используют температурную шкалу Цельсия. Если температура вещества, выраженная в градусах Цельсия, изменяется на величину $\Delta t = t_2 - t_1$ и при этом вещество получает или отдаёт количество теплоты Q, то

$$c = \frac{Q}{m\Delta t}. \qquad (2.27)$$

2.2.5 Работа в термодинамике

Работа в термодинамике – количественная мера изменения внутренней энергии тел при их механическом взаимодействии.

Работа A, совершаемая термодинамической системой над внешними телами, численно равна энергии, передаваемой системой внешним телам при механическом взаимодействии без теплообмена.

Если внешние тела совершают над системой работу A', то можно считать, что в этом случае система совершает над внешними телами отрицательную работу: $A = -A'$.

Работа, совершаемая идеальным газом при изменении объема при постоянном давлении $p = const$:

$$A = p \cdot \Delta V, \qquad (2.28)$$

где $\Delta V = V_2 - V_1$ – изменение объёма газа от начального V_1 до конечного V_2 значения.

Если газ расширяется: $V_2 > V_1$, то $A > 0$. Газ совершает положительную работу, т.е. газ совершает работу над окружающими телами, увеличивая их внутреннюю энергию.

Если газ сжимают внешние тела: $V_2 < V_1$, то $A < 0$. Внешние тела совершают работу $A' = -A$ над данным газом, увеличивая его внутреннюю энергию. В этом случае можно считать, что газ совершает отрицательную работу.

Работе газа можно дать геометрическое истолкование (рис. 2.6). Работа газа численно равна площади фигуры *abcd*, ограниченной графиком *p*-*V* диаграммы данного процесса (фигура, выделенная цветом на рис. 2.6).

а) p = const *б) произвольный процесс*

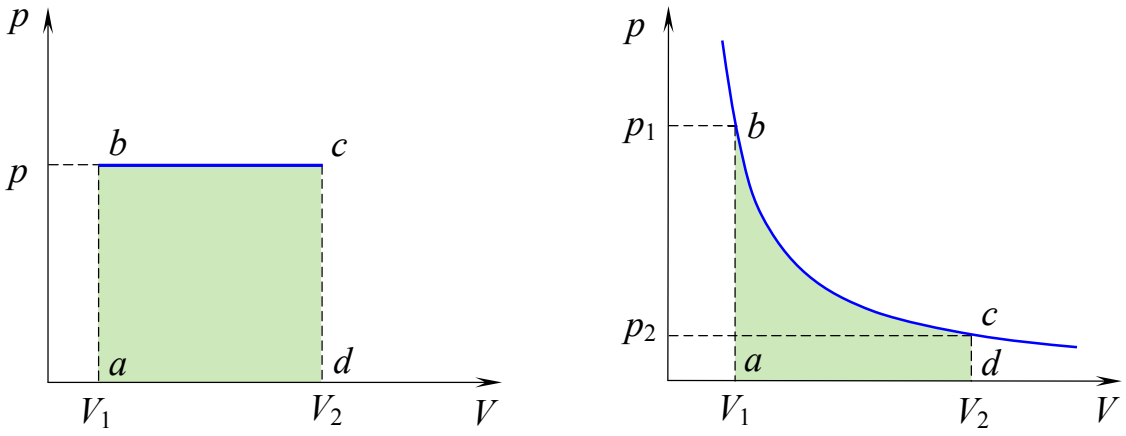

Рис. 2.7. Геометрическое истолкование работы в термодинамике

2.2.6 Уравнение теплового баланса

Если в изолированной системе находятся тела с различной температурой и никакой работы внутри этой системы не совершается, то тела обмениваются энергией за счёт теплообмена. В результате теплообмена в системе со временем устанавливается тепловое равновесие, и температуры всех тел выравниваются. При этом суммарная внутренняя энергия такой системы не изменяется.

В изолированной системе, внутри которой не совершается работа, сумма количеств теплоты отданных и полученных любым телом в процессе установления теплового равновесия, равна нулю:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots = 0. \qquad (2.29)$$

В **уравнении теплового баланса** (2.29) количества теплоты, полученные телом, берутся со знаком плюс, а отданные телом – со знаком минус.

При нагревании (охлаждении) тела:

$$Q_i = cm(t_2 - t_1), \qquad (2.30)$$

где t_1 – первоначальная температура тела; t_2 – конечная (установившаяся) температура. Если $t_2 > t_1$ (нагревание), то $Q_i > 0$. Если $t_2 < t_1$ (охлаждение), то $Q_i < 0$.

При парообразовании (конденсации), при плавлении (кристаллизации), при сгорании топлива используются, соответственно, формулы (2.19); (2.20), (2.21).

2.2.7 Первый закон термодинамики

Данный закон называют также **первым началом термодинамики**.

Количество теплоты, сообщенное системе, расходуется на изменение внутренней энергии системы и на совершение системой работы над внешними телами.

$$Q = \Delta U + A\ . \qquad (2.31)$$

Здесь Q – суммарное количество теплоты, сообщённое системе в ходе термодинамического процесса, $\Delta U = U_2 - U_1$ – изменение внутренней энергии системы в результате проведения данного процесса, A – полная работа, совершённая системой над внешними телами в ходе данного процесса.

Если система отдаёт внешним телам количество теплоты Q', то $Q < 0$ ($Q = -Q'$). Если внешние тела совершают работу над данной системой, то $A < 0$ ($A = -A'$).

Если тело в ходе данного термодинамического процесса нагревается, то $\Delta U > 0$ (внутренняя энергия возрастает), если охлаждается, то $\Delta U < 0$ (внутренняя энергия уменьшается).

Если система изолированная ($Q = 0$) и внутри неё не совершается работа ($A = 0$), то $\Delta U = 0$, т.е. внутренняя энергия системы не изменяется: $U = const$. Отсюда и следует уравнение теплового баланса.

Из первого закона термодинамики вытекает невозможность создания вечного двигателя. Если $Q = 0$, то $A = -\Delta U$, т.е. двигатель, не получая энергию извне, может совершать работу только за счёт убыли своей внутренней энергии. Исчерпав внутреннюю энергию, двигатель остановится.

Применение первого закона термодинамики к идеальным газам

Изотермический процесс

$T = const$; следовательно $\Delta U = 0$, т.е. $U = const$ (в изотермическом процессе внутренняя энергия идеального газа не изменяется). Первый закон термодинамики для изотермического процесса:

$$Q = A\ . \qquad (2.32)$$

Всё тепло, подведённое к идеальному газу, идёт на совершение газом работы.

Изохорный процесс

$V = const$; следовательно, $A = 0$. Первый закон термодинамики для изохорного процесса:

$$Q = \Delta U . \tag{2.33}$$

Изобарный процесс

$p = const$; $A = p \cdot \Delta V$. Первый закон термодинамики для изобарного процесса:

$$Q = \Delta U + p \cdot \Delta V . \tag{2.34}$$

Адиабатный процесс

Адиабатный процесс – процесс, который идёт без теплообмена с окружающими телами.

При адиабатном процессе $Q = 0$. Первый закон термодинамики для адиабатного процесса:

$$A = -\Delta U . \tag{2.35}$$

При расширении газ совершает положительную работу: $A > 0$; следовательно, $\Delta U < 0$ (внутренняя энергия уменьшается). Соответственно снижается температура газа. **При адиабатном расширении газ охлаждается**.

При сжатии над газом совершают работу внешние тела. Работа, совершаемая газом, отрицательна: $A < 0$; следовательно, $\Delta U > 0$ (внутренняя энергия увеличивается). Соответственно повышается температура газа. **При адиабатном сжатии газ нагревается**.

В адиабатном процессе давление идеального газа изменяется быстрее, чем в изотермическом процессе.

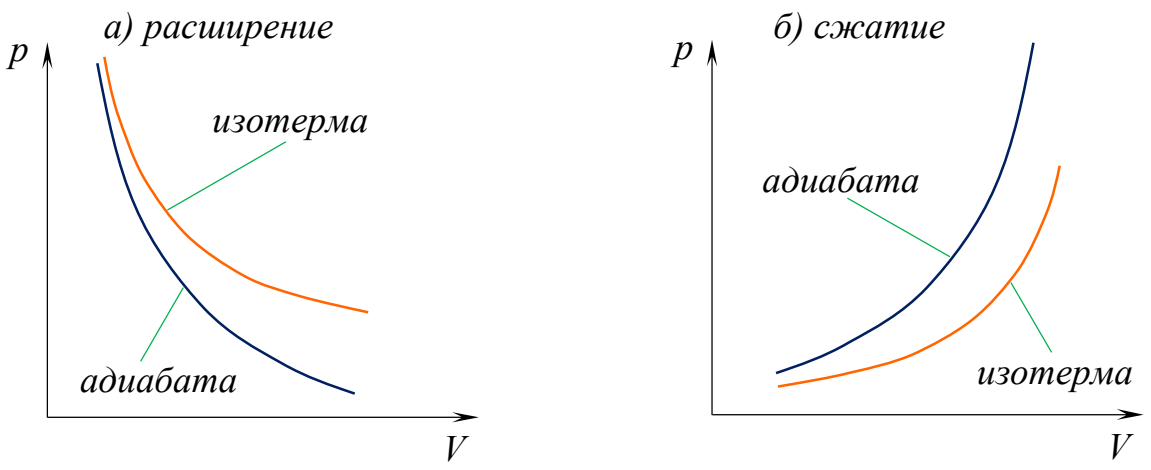

Рис. 2.8. *p-V* диаграммы адиабатного и изотермического процессов

2.2.8 Второй закон термодинамики

Второй закон термодинамики определяет направление протекания термодинамических процессов.

Формулировка (постулат) Клаузиуса:

Невозможны такие процессы, единственным результатом которых был бы переход тепла от менее нагретого тела к более нагретому.

Формулировка (постулат) Кельвина:

Невозможны циклические процессы, единственным результатом которых было бы превращение в работу всего полученного извне тепла.

Фактически постулат Кельвина говорит о невозможности создания тепловой машины с коэффициентом полезного действия, равным единице.

2.2.9 КПД тепловой машины

Коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2'}{Q_1}, \qquad (2.36)$$

где A – полезная работа, совершаемая тепловой машиной за цикл; Q_1 – количество теплоты, получаемое рабочим телом тепловой машины за цикл; Q_2' – количество теплоты, отдаваемое за цикл холодильнику.

Коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \qquad (2.37)$$

где T_1 – температура нагревателя; T_2 – температура холодильника.

2.2.10 Принципы действия тепловых машин

Тепловая машина – периодически действующее устройство, совершающее полезную работу за счет подводимого извне тепла.

Всякая тепловая машина имеет в своем составе рабочее тело, нагреватель и холодильник.

Рабочее тело – вещество, образующее термодинамическую систему, которая получает извне теплоту и совершает полезную работу.

Нагреватель – устройство, сообщающее рабочему телу теплоту, необходимую для совершения полезной работы.

Холодильник – устройство, которому рабочее тело отдает некоторое количество теплоты при возращении в исходное состояние.

В основе действия тепловой машины лежит круговой процесс (цикл), совершаемый рабочим телом (рис. 2.8). В первой части цикла (участок 1–2 диаграммы) рабочее тело получает от нагревателя некоторое количество теплоты Q_1, расширяется и производит работу $A_1 > 0$.

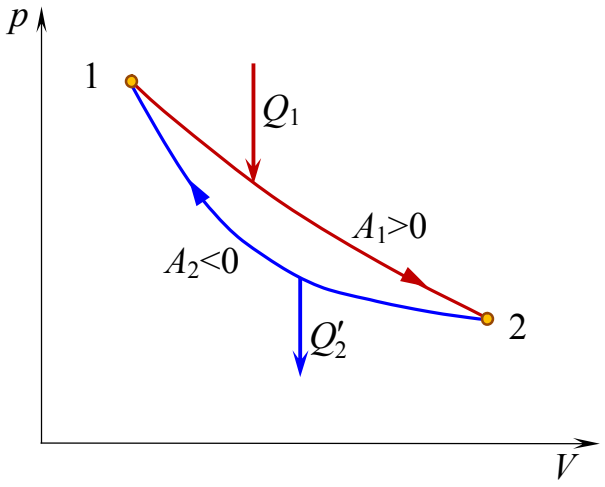

Рис. 2.8. Цикл тепловой машины

Во второй части цикла (участок 2–1 диаграммы) рабочее тело возвращается в исходное состояние: происходит сжатие рабочего тела до первоначального объема и передача холодильнику некоторого количества теплоты Q_2'. При сжатии рабочего тела над ним производится работа $A_2' > 0$. Соответственно, можно считать, что рабочее тело на этом участке совершает отрицательную работу $A_2 = -A_2'$ и получает отрицательное количество теплоты $Q_2 = -Q_2'$.

Полезная работа, совершаемая тепловой машиной, за цикл:

$$A = A_1 - A_2' = Q_1 - Q_2'. \qquad (2.38)$$

Цикл Карно

Цикл Карно – цикл идеализированной тепловой машины, состоящий из двух изотерм и двух адиабат (рис. 2.9). Идеализация заключается в том, данный цикл состоит из равновесных (квазистатических) процессов, и поэтому должен проводиться бесконечно медленно.

На участке 1–2 (T_1 = const) происходит изотермическое расширение рабочего тела. При этом рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты Q_1 . На участке 2–3 происходит адиабатическое расширение рабочего тела. В процессе расширения совершается положительная работа A_1.

На участке 3–4 (T_2 = const, $T_2 < T_1$) происходит изотермическое сжатие рабочего тела. В процессе изотермического сжатия рабочее тело отдает холодильнику количество теплоты Q_2'. Завершается цикл адиабатическим сжатием на участке 4–1. При сжатии над рабочим телом совершается работа A_2'.

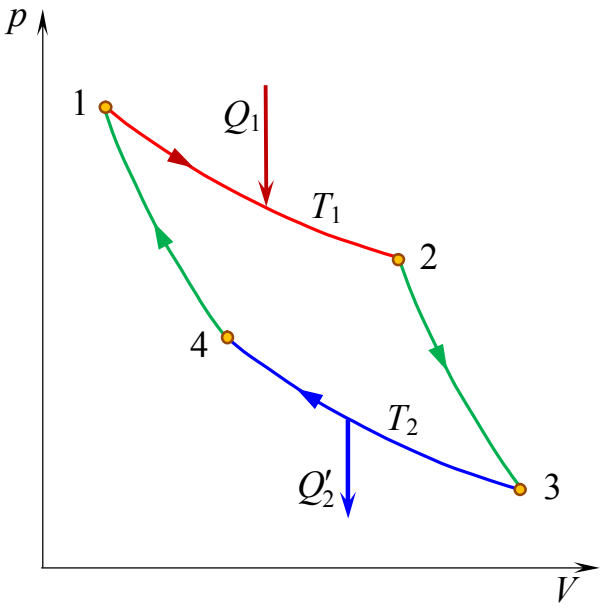

Рис. 2.9. Цикл Карно

Первая теорема Карно.

Коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно, зависит только от температур нагревателя и холодильника и не зависит от конструкции машины и свойств рабочего вещества.

Вторая теорема Карно.

Из всех круговых процессов в термодинамике цикл Карно обладает наивысшим коэффициентом полезного действия:

$$\frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1} \le \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \qquad (2.39)$$

2.2.11 Проблемы энергетики и охрана окружающей среды

Энергетические потребности человечества в настоящее время обеспечиваются, главным образом, за счет трех видов энергоресурсов: запасов органического топлива, природных водных ресурсов и ископаемых источников ядерного топлива.

Энергетике принадлежит первенство во всех видах загрязнения человеком окружающей среды: тепловом, аэрозольном, электромагнитном, радиоактивном.

Существует две основные проблемы энергетики: ограниченность энергоресурсов и загрязнение окружающей среды.

Для решения проблем энергетики необходим экономически оправданный переход на альтернативные неисчерпаемые и безопасные источники энергии. Перспективы заключаются, прежде всего, в освоении энергии термоядерного синтеза, солнечной энергии, ветровой энергии.

Дополнение. Тепловое расширение тел

Линейное тепловое расширение твёрдых тел

$$l = l_0\left(1 + \alpha t\right), \tag{2.40}$$

где l – линейный размер тела при температуре t °C; l_0 – линейный размер тела при температуре $t_0 = 0$ °C; α – температурный (термический) коэффициент линейного расширения вещества.

Объёмное тепловое расширение тел

$$V = V_0\left(1 + \beta t\right), \tag{2.40}$$

где V – объём тела при температуре t °C; V_0 – объём тела при температуре $t_0 = 0$ °C; β – температурный (термический) коэффициент объёмного расширения вещества.

Для твёрдых тел: $\beta = 3\alpha$.

Для идеальных газов: $\beta = \dfrac{1}{273}\,°\text{C}^{-1}$ или $\beta = \dfrac{1}{273}\ \text{K}^{-1}$.

<u>Аномалия воды</u>

Вода – единственная жидкость, тепловое расширение которой при температурах, близких к $t_0 = 0$ °C, носит нелинейный характер. При охлаждении ниже 4 °C вода начинает расширяться. Ещё большее расширение происходит при образовании льда. В результате лёд имеет меньшую плотность, чем вода при низких температурах. Поэтому лёд в воде плавает и в природных водоёмах образует защитный покров, препятствуя их полному промерзанию.