Тема 3: ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

- ***3.1. ЭНЕРГИЯ И ЭНТРОПИЯ***

- *Второй закон устанавливает, что самопроизвольные процессы возможны лишь в том случае, когда в системе нет равновесия, и что эти процессы всегда протекают в направлении, при котором система приближается к равновесному состоянию*

- *.Таким образом, второй закон термодинамики позволяет указать направление теплового потока и устанавливает максимально возможный предел превращения теплоты в работу в тепловых машинах. Наиболее общая формулировка второго закона термодинамики дана Клаузиусом в виде следующего постулата: "Теплота не может самопроизвольно (без компенсации) переходить от менее нагретого тела к более нагретому".*

- *С открытием первого закона термодинамики было осознано значение энергии в материальном мире. Замечено, что все виды энергии, в конечном счете, превращаются в теплоту, которая затем рассеивается в окружающей среде. Мера этого рассеивания была названа энтропией. Чем больше рассеивается (обесценивается) энергия, тем больше увеличивается энтропия.*

- *Энергия и энтропия являются неотъемлемыми свойствами материи, причем энергия есть мера движения материи, а энтропия – мера рассеивания (деградации) энергии. Кроме видов энергии различают формы передачи энергии. В термодинамике приняты две формы обмена энергии: работа и теплота процесса.*

- *Теплота, связанная с движением молекул и атомов, является микроскопической формой передачи энергии, а работа, связанная с перемещением тела или его частей, – макрофизической.*

- *Следует заметить, что теплота и работа не являются равноценными формами передачи энергии. Работа непосредственно может быть преобразована в любой вид энергии. Теплота без промежуточного превращения в работу может быть направлена на увеличение запаса лишь внутренней энергии тела. Работа, без каких бы то ни было ограничений, может быть превращена в теплоту, а переход теплоты в работу, согласно второму закону термодинамики, без компенсации (без некоторого дополнительного процесса) невозможен.*

3.2. РАВНОВЕСНОСТЬ И ОБРАТИМОСТЬ ПРОЦЕССОВ

- *Термодинамическая система будет находиться в равновесном состоянии, если во всех точках системы будет одинаковая температура и одинаковое давление.*

- *Всякая изолированная система с течением времени приходит в равновесное состояние, которое остается неизменным до тех пор, пока система не будет выведена из него внешним воздействием. Действительно, равновесный процесс должен состоять из ряда чередующихся во времени состояний равновесия, однако переход из одного состояния в другое возможен лишь в результате нарушения этого равновесия.*

- *Тем не менее, техническая термодинамика изучает только равновесные состояния и равновесные процессы, так как отсутствие равновесия внутри термодинамической системы приводит к зависимости параметров состояния от времени. Поэтому анализ неравновесных состояний и процессов значительно усложняется.*

- *Итак, равновесный процесс можно представить как непрерывный ряд бесконечно близких состояний и можно изобразить линиями на термодинамических диаграммах, например, pv и Ts.*

- *Все реальные термодинамические процессы протекают при конечной разности давлений и температур рабочего тела и окружающей среды. Следовательно, реальные процессы всегда неравновесны.*

- *С понятием равновесности процессов связано понятие их обратимости.*

- *Допустим, что в некоторой изолированной системе протекает процесс 1–2 (из состояния 1 система переходит в состояние 2). Тогда для обратного перехода системы из состояния 2 в состояние 1 имеем два случая:*

  1) обратный процесс возможен, и протекает без каких бы то ни было изменений в окружающей среде. В этом случае процесс 1–2 принято считать обратимым;

  2) обратный процесс, протекающий без изменений в окружающей среде, невозможен. В данном случае процесс 1–2 будет необратимым.

3.3. УСЛОВИЯ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

- *Для того чтобы от тепловой машины можно было получить полезную работу, необходимо выполнить следующие условия.*
- *Необходимо иметь рабочее тело – это тело, посредством которого осуществляется взаимное превращение теплоты и работы.*
- *Необходимо наличие, по меньшей мере, двух источников теплоты с разными температурами – верхний (высший) источник теплоты (ВИТ) или нагреватель и нижний (низший) источник теплоты (НИТ) или холодильник.*
- *Работа тепловой машины должна быть цикличной, т.е. рабочее тело, совершая ряд процессов, должно возвращаться в исходное состояние.*
- *Рассмотрим круговой цикл тепловой машины, изображенный на рис.3.1.*

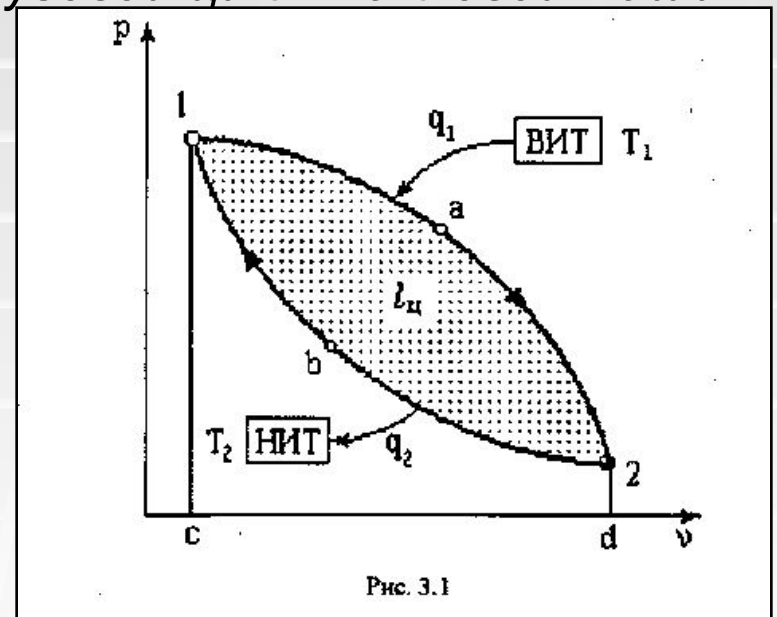

Рис. 3.1

- *В процессе расширения 1–a–2 от ВИТ с температурой T1 к рабочему телу подводится теплота в количестве q1. При этом получается положительная работа l1, численно равная площади c–1–a–2–d.*
- *В процессе сжатия 2–b–1 от рабочего тела отводится теплота q2 к НИТ с температурой T2. В этом процессе затрачивается работа l2 (работа отрицательная), равная площади c–l–b–2–d.*
- *Уравнение первого закона термодинамики для процессов 1–a–2 и 2–b–1 соответственно будет иметь вид*

$$q_1 = \pm\Delta u + l_1 \quad ;(3.1) \qquad -q_2 = \pm\Delta u - l_2 \quad (3.2)$$

- *Различные знаки изменения внутренней энергии Du взяты потому, что внутренняя энергия за цикл не должна изменяться. Сложив уравнения (3.1) и (3.2), получим*

$$q_1 - q_2 = l_1 - l_2 = l_{\text{ц}} \quad ,$$

- *где lц – работа цикла 1-a-2-b-1.*

- *Чтобы получить полезную работу, работа, затраченная на сжатие в процессе 2–b–1, должна быть меньше работы расширения в процессе 1–a–2 (l2<l1). Чтобы этого достичь, необходимо одновременно со сжатием охлаждать рабочее тело, отнимая у него теплоту q2.*

- *Если при сжатии не охлаждать рабочее тело, то процесс сжатия пойдет по пути 2–a–1 и на сжатие будет потрачена та же самая работа l1, которая была получена в процессе расширения. В результате полезная работа цикла будет равна нулю.*

- *Таким образом, повторяя последовательно цикл 1–a–2–b–1 с подводом и отводом теплоты, можно получить непрерывно действующую тепловую машину.*

- *Коэффициент полезного действия (кпд) цикла тепловой машины определяется по формуле*

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad . \ (3.3)$$

- *Таким образом, коэффициентом полезного действия тепловой машины называется отношение полезной работы, полученной в цикле, ко всей затраченной теплоте. Коэффициент полезного действия тепловой машины всегда меньше 1 (или 100%), так как не вся теплота q1, подведенная к рабочему телу, превращается в работу. Часть этой теплоты в количестве q2 отводится в окружающую среду.*

3.4. ЦИКЛ КАРНО

- *Анализируя формулу (3.3), можно заметить, что ht возрастает при уменьшении q2 или увеличении q1. Отсюда можно заключить, что, выбирая соответствующим образом процессы расширения и сжатия, протекающие с подводом и отводом теплоты q1, q2, можно изменять величину кпд. В связи с этим возникает вопрос – можно ли найти такой цикл, который обладал бы наибольшим кпд?*
- *Такой цикл был предложен Сади Карно. Он состоит из двух обратимых изотермических и двух обратимых адиабатных процессов (см. рис.3.2, 3.3).*

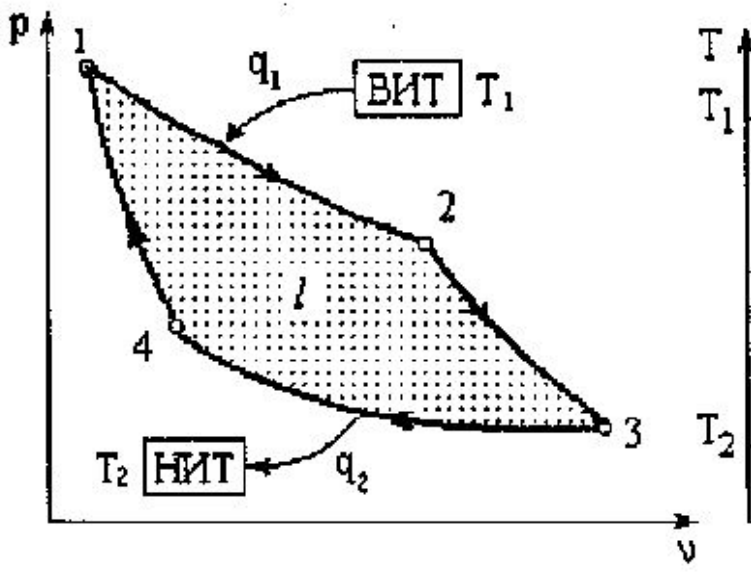

Рис. 3.2.

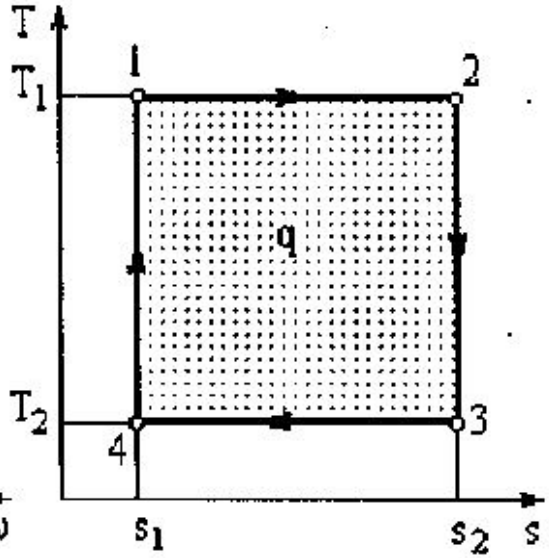

Рис. 3.3.

- *Изотермический и адиабатный процессы являются самыми выгодными процессами в смысле получения работы, т.к. в изотермическом процессе вся теплота, подводимая к рабочему телу, превращается в работу, а адиабатный процесс протекает без теплообмена.*
- *Рассмотрим все процессы цикла Карно. Процесс 1–2 представляет процесс изотермического расширения рабочего тела с подводом теплоты q1 от верхнего источника теплоты с температурой T1. Количество теплоты q1, равное работе l1, полученной в процессе 1–2, определяется по формуле (см. § 4.4 – изотермический процесс).*

$$l_1 = q_1 = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{RT_1}{v} dv = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \quad .$$

- *Работа l1 определяется также площадью фигуры v1 –l–2–v2 (см. рис.3.2.).*
- *Процесс 2–3 является процессом адиабатического расширения. Газ совершает работу, численно равную площади фигуры v2–2–3–v3 и определяемую по формуле (см. адиабатный процесс § 4.5).*

$$l_2 = \frac{R(T_1 - T_2)}{k - 1} \quad ,$$

- *где k – показатель адиабаты.*

- *В процессе 3–4 происходит изотермическое сжатие рабочего тела с отводом теплоты q2 к низшему источнику теплоты с температурой Т2. На сжатие затрачивается работа l3, численно равная площади фигуры v4–4–3–v3, равная количеству отведенной теплоты q2 и определяемая по формуле*

$$l_3 = q_2 = -RT_2 \ln \frac{v_3}{v_4} .$$

- *В процессе адиабатного сжатия 4–1 газ нагревается до температуры Т1. Работа, затрачиваемая на сжатие, численно равна площади фигуры v1–l–4–v4 и определяется по формуле*

$$l_4 = -\frac{R(T_1 - T_2)}{k-1} .$$

- *Полезная работа lц цикла 1–2–3–4 определяется алгебраической суммой работ, полученных или затраченных в отдельных процессах цикла. Суммируя площади, выражающие работу газа в отдельных процессах цикла, с учетом знаков работы получим*

ц=пл.1-2-3-4-1=пл.v1-1-2-v2+пл.v2-2-3-v3-пл.v3-3-4-v4-пл.v4-4-1-v1.

- *Суммируя формулы работ для всех процессов цикла, получим*

$$l_{\text{ц}} = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} + \frac{R(T_1 - T_2)}{k-1} - RT_2 \ln \frac{v_3}{v_4} - \frac{R(T_1 - T_2)}{k-1}$$

- *Из полученной формулы видно, что работы в адиабатных процессах 2–3 и 4–1 взаимно уничтожаются. Тогда формула (3.4) примет вид*

$$l_{\text{ц}} = R\left(T_1 \ln\frac{v_2}{v_1} - T_2 \ln\frac{v_3}{v_4} \right) \quad .$$

- *Коэффициент полезного действия любого цикла тепловой машины (в том числе и цикла Карно) определяется по формуле* $\eta_t = l_{\text{ц}} / q_1$
- *Отсюда*

$$\eta_t = \frac{\left(T_1 \ln\frac{v_2}{v_1} - T_2 \ln\frac{v_3}{v_4} \right)}{T_1 \ln\frac{v_2}{v_1}} \quad .(3.5)$$

- *Для адиабат 2–3 и 4–1 справедливы следующие зависимости*

$$T_1 v_2^{k-1} = T_2 v_3^{k-1};$$
$$T_1 v_1^{k-1} = T_2 v_4^{k-1}.$$

- *После деления первого уравнения на второе получим*

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} \quad .$$

- *Логарифмируя последнее соотношение, будем иметь*

$$\ln\frac{v_2}{v_1} = \ln\frac{v_3}{v_4} \qquad .(3.6)$$

- *Формула (3.5), учитывая (3.6), примет вид*

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (3.7)$$

- *Анализируя формулу (3.7) приходим к выводу, что ht может быть равен единице лишь в случаях, когда , либо Т2=0 К. Эти условия невозможно осуществить даже в идеальном цикле, так как температура верхнего источника теплоты Т1, равная бесконечности, практически недостижима, а также и недостижима температура нижнего источника теплоты Т2, равная абсолютному нулю температур Т2=0 К= – 273,15°С.*

Анализируя формулу (3.7) приходим к выводу, что ht может быть равен единице лишь в случаях, когда , либо T2=0 К. Эти условия невозможно осуществить даже в идеальном цикле, так как температура верхнего источника теплоты T1, равная бесконечности, практически недостижима, а также и недостижима температура нижнего источника теплоты T2, равная абсолютному нулю температур T2=0 К= – 273,15°С.

- *Анализируя формулу (3.7), можно сделать еще один важный вывод – кпд Цикла Карно зависит лишь от температур верхнего и нижнего источников теплоты и, следовательно, не зависит от рода рабочего тела. Это утверждение является содержанием теоремы Карно.*
- *В реальных циклах тепловых двигателей (например, в двигателях внутреннего сгорания) цикл Карно неприменим. Из-за небольшого различия в наклонах изотерм и адиабат получаются большие размеры цикла по оси v. Это означает, что в реальном двигателе нужно применять очень длинный цилиндр. В результате будут велики потери на трение и теплообмен из-за необратимости процесса, а также большие габариты и вес двигателя.*

3.5. ОБРАТНЫЙ ОБРАТИМЫЙ ЦИКЛ КАРНО

- *Цикл Карно может протекать не только в прямом, но и в обратном направлении (см. рис. 3.4.). Машины, работающие по обратному циклу, называются холодильными машинами. Это тепловые машины, которые создают и поддерживают разность температур путем отнятия теплоты у более холодного тела и передачи ее более горячему (см. глава 12). А такой процесс, как следует из формулировки второго закона термодинамики Клаузиуса, требует затраты энергии (не может совершаться без компенсации).*

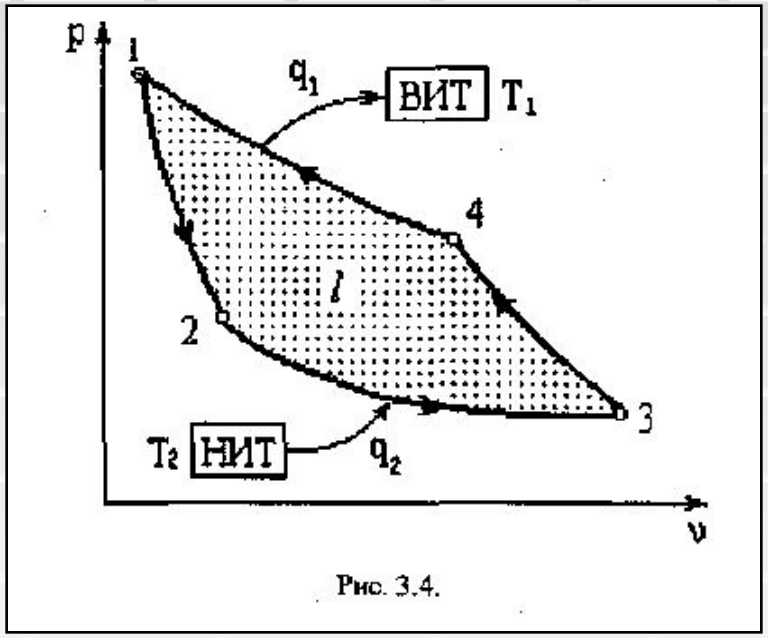

Рис. 3.4.

- *Рассмотрим обратимый обратный цикл Карно, изображенный на рис. 3.4. В процессе 1–2 рабочее тело (холодильный агент) расширяется по адиабате с уменьшением температуры от Т1 в точке 1 до Т2 в точке 2. Затем газ расширяется по изотерме 2–3 с подводом теплоты q2 от источника с температурой Т2. В адиабатном процессе сжатия 3–4 происходит увеличение температуры рабочего тела от Т2 до Т1. В изотермическом процессе сжатия происходит отвод от рабочего тела теплоты q1 к верхнему источнику теплоты.*

- *На осуществление обратного цикла в холодильной машине затрачивается удельная работа l. При этом от НИТ к ВИТ переносится количество теплоты, равное q2. Кроме того, к ВИТ передается теплота, равная затраченной работе l. Отсюда, вся теплота, получаемая ВИТ, будет* $q_1 = q_2 + l$.

- *Работа, затраченная на сжатие в процессах 3–4 и 4–1, больше работы расширения в процессах 1–2 и 2–3 на величину площади фигуры 1–2–3–4. Работа расширения производится сжатым газом, и она будет положительной. Работа сжатия производится над газом, и она будет отрицательной. Отсюда суммарная работа, затраченная на передачу теплоты от НИТ к ВИТ, будет отрицательной.*

- *Работа, затраченная на сжатие в процессах 3–4 и 4–1, больше работы расширения в процессах 1–2 и 2–3 на величину площади фигуры 1–2–3–4. Работа расширения производится сжатым газом, и она будет положительной. Работа сжатия производится над газом, и она будет отрицательной. Отсюда суммарная работа, затраченная на передачу теплоты от НИТ к ВИТ, будет отрицательной. Она будет равна* $l = q_1 - q_2$.

- *Эффективность работы холодильных машин характеризуется холодильным коэффициентом, определяемым в виде отношения теплоты, взятой от НИТ и переданной ВИТ, к затраченной работе*

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{q_2}{l} .$$

- *Холодильный коэффициент характеризует эффективность передачи теплоты от НИТ к ВИТ. Он будет тем больше, чем большее количество теплоты q2 будет взято от НИТ и передано ВИТ и чем меньше будет на это затрачено работы l.*

- *Холодильный коэффициент обратимого обратного цикла Карно определяется по формуле*

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad .$$

- *Холодильный коэффициент этого цикла зависит лишь от абсолютных температур Т1 и Т2 и имеет наибольшее значение по сравнению с холодильными коэффициентами любых других циклов, протекающих в тех же температурных пределах.*

- *Холодильные машины, предназначенные для отопления помещений путем передачи теплоты от источника с более низкой температурой к источнику с более высокой температурой, называются тепловыми насосами. Их эффективность оценивается отопительным коэффициентом j, определяемым по формуле*

$$\varphi = \frac{q_1}{l} \quad .$$