

## Лекция 18

### ЦИКЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ. ТЕПЛОВАЯ МАШИНА

#### Термины и понятия

Адиабата	Подключать
Адиабатический процесс	Потеря, потерять
Возвратить (-ся), возвращать (-ся)	Прямой цикл
Двигатель	Приведенное количество теплоты
Замкнутый процесс	Производить
Цикл Карно	Рабочее тело
Круговой процесс	Резервуар
Коэффициент полезного действия	Теплообмен
Нагреватель	Цикл
Насос	Цилиндр
Обратный цикл	Холодильная машина
Обратимый процесс	Холодильник
Петля	

#### 18.1. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ. ПРЯМОЙ ЦИКЛ

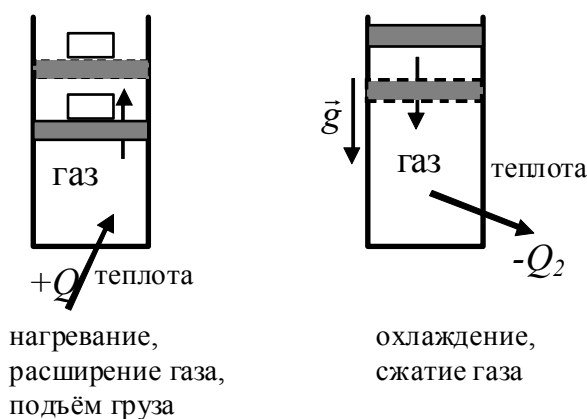
Прежде чем перейти ко второму началу термодинамики, необходимо рассмотреть замкнутые процессы, эти процессы называются также круговыми процессами или циклами. Круговым процессом (или циклом) называется такой процесс, в результате которого термодинамическая система, претерпев ряд изменений, возвращается в исходное состояние.

Круговой процесс может быть равновесным или неравновесным. Всякий равновесный процесс представляет непрерывную последовательность равновесных состояний термодинамической системы. Равновесные состояния – это такие состояния, в которых все параметры системы имеют определенные значения и остаются постоянными до тех пор, пока не изменятся внешние условия. В равновесном процессе внешние условия изменяются настолько медленно, что термодинамическая система успевает прийти в равновесие с окружающей средой. Всякий равновесный процесс является **обратимым**: термодинамическую

систему можно вернуть из конечного состояния в начальное, и при этом во внешней среде не произойдет никаких изменений. Это означает, что в обратном процессе система пройдет через те же состояния, через которые она проходила в прямом процессе.

**Тепловой машиной** называется любое периодически действующее устройство, которое производит работу за счет получаемой извне теплоты. *Прямым круговым процессом (циклом тепловой машины)* называется цикл, в котором полученная извне теплота превращается в полезную работу. *Обратным круговым процессом (циклом холодильной машины)* называется цикл, в котором полученная извне работа затрачивается на перенос теплоты от менее нагретых тел к более нагретым телам. Если тело (термодинамическая система) производит работу за счет внутренней энергии теплового резервуара, то его называют **рабочим телом тепловой машины или просто рабочим телом**. Система может состоять из одного рабочего тела.

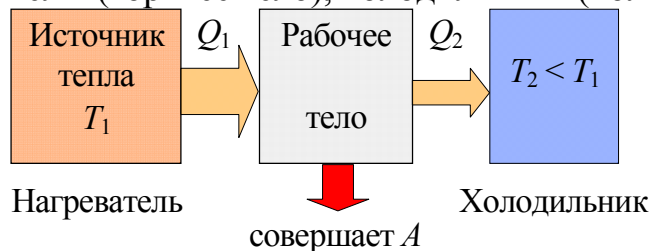
Пример простейшей тепловой машины: идеальный газ, заключенный в вертикальном цилиндре с подвижным поршнем. Если на поршень поставить груз и нагревать газ в цилиндре, то в результате нагревания



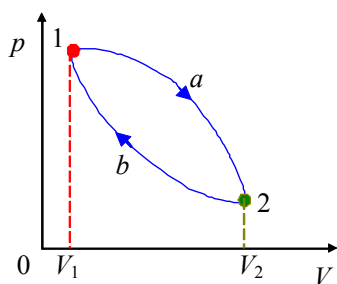
газ расширяется и совершает полезную работу по поднятию груза (газ получает теплоту  $Q_1$ ). Если груз убрать и прекратить нагревание газа, то газ отдает тепло в окружающую среду (газ отдает теплоту  $Q_2$ ) и его объем уменьшается. Среда выполняет роль холодильника. Поршень вернется в начальное состояние. Таким образом, мы имеем модель периодически

действующего устройства (тепловой машины), которое превращает в полезную работу (подъем груза) часть тепла, полученного из внешней среды.

Таким образом, модель простейшей тепловой машины: нагреватель (горячее тело), холодильник (холодное тело), рабочее тело (газ).



От нагревателя отбирается теплота  $Q_1$ , которая расходуется на совершение работы  $A$ , холодильнику передаётся теплота  $Q_2$ .

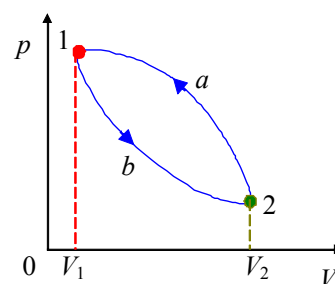


Прямой цикл протекает по часовой стрелке  
 $A_{\text{за цикл}} > 0$   
 $A = A_{1a2} - A_{2b1}$

Графически представлением циклов тепловой машины и холодильной машины в координатах  $P, V$  являются замкнутые линии.

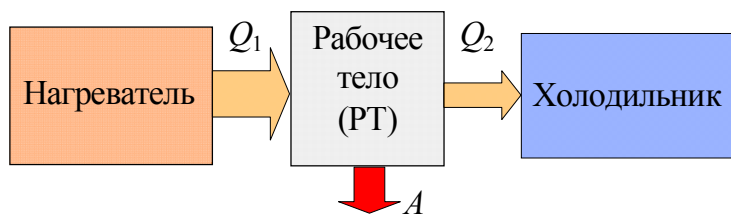
Если при совершении цикла обход замкнутой линии осуществляется по часовой стрелке, то полезная работа  $A$  цикла положительная. В этом случае это цикл **тепловой машины**.

Если при совершении цикла обход замкнутой линии осуществляется против часовой стрелки, то полезная работа  $A$  цикла отрицательная. В этом случае это цикл **холодильной машины**.

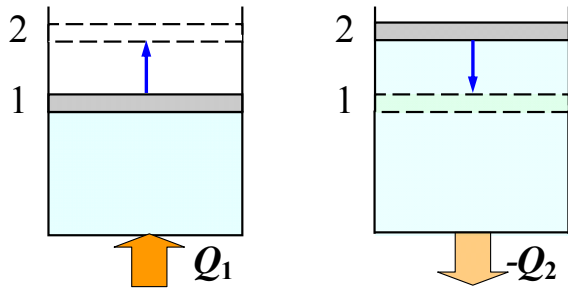


Обратный цикл протекает против часовой стрелки  
 $A_{\text{за цикл}} < 0$   
 $A = A_{2b1} - A_{1a2}$

Итак, циклически действующее устройство, превращающее тепло в работу, называется *тепловой машиной* или *тепловым двигателем*.



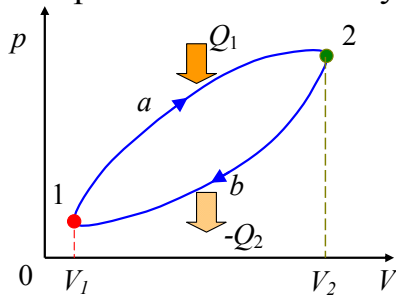
$Q_1$  – тепло, получаемое рабочим телом от нагревателя,  
 $Q_2$  – тепло, передаваемое рабочим телом холодильнику,  
 $A$  – полезная работа (работа, совершаемая рабочим телом при передаче тепла).



В цилиндре находится газ – рабочее тело.

Начальное состояние рабочего тела на диаграмме  $p(V)$  изображено точкой 1.

Цилиндр подключают к нагревателю, рабочее тело нагревается и расширяется, рабочее тело переходит в состояние 2. Это состояние на диаграмме  $p(V)$  изображено точкой 2. Рассмотрим произвольный круговой прямой цикл. Пусть рабочее тело перешло из состояния 1 в состояние 2 по кривой  $1a2$ . Рабочим телом является идеальный газ. Значит, идеальный газ расширился, его объем изменился от  $V_1$  до  $V_2$ . Газ совершил положительную работу  $A_1$ .



Процесс  $1a2$ :  $Q_1 = U_2 - U_1 + A_1$  – первое начало термодинамики.

Работа  $A_1$  равна площади под кривой  $1a2$ .

Вернем газ в исходное состояние (в состояние 1). Для этого газ нужно сжать, то есть совершить работу над газом. Пусть сжатие газа происходит по кривой  $2b1$  (направление процесса указано стрелкой). Обозначим  $A_2$  – работа, которая совершается при сжатии газа. Если внешние силы совершают работу над системой, то работа считается отрицательной. Следовательно,  $A_2 < 0$ . Графически  $A_2$  выражается площадью под кривой  $2b1$ .

Рабочее тело вернулось в исходное состояние. Система совершила цикл. Полезная работа  $A$  графически выражается площадью петли  $1a2b1$ .

Суммарная (полезная) работа, совершенная в результате этого цикла равна разности площадей: площадь под кривой  $1a2$  минус площадь под кривой  $2b1$  или  $A_1 - A_2$ . Таким образом,

$$A = A_1 + (-A_2) = A_1 - A_2.$$

Вычислим коэффициент полезного действия (КПД) этого цикла. **Коэффициент полезного действия тепловой машины (КПД)** равен

отношению произведенной машиной за цикл полезной работы  $A$  к полученной извне теплоте  $Q_1$ :  $\eta = \frac{A}{Q_1}$ .

Применим к циклу тепловой машины первое начало термодинамики:  $Q = \Delta U + A$ , где  $Q$  – полученное рабочим телом количество теплоты за цикл,  $\Delta U$  – приращение внутренней энергии рабочего тела за цикл. Так как внутренняя энергия является функцией состояния, её приращение за цикл равно нулю:  $\Delta U = 0$ . Величина  $Q$  – алгебраическая сумма теплоты, полученная рабочим телом за цикл, в процессах нагревания и охлаждения. Тогда  $Q = Q_1 - Q_2$ .

$$Q = \Delta U + A, \text{ так как } \Delta U = 0, \text{ то } Q = A = Q_1 - Q_2.$$

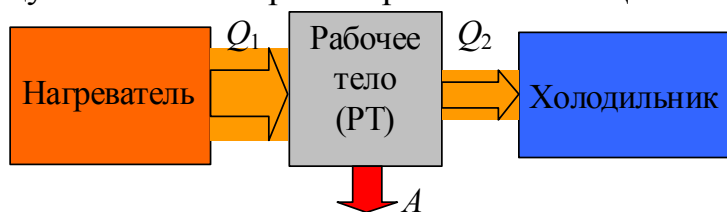
Коэффициент полезного действия, сокращенно, КПД тепловой машины  $\eta$  – это отношение работы к количеству теплоты, полученной от нагревателя.

$$\eta = \frac{A}{Q_1} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Так как  $Q_2 < Q_1$ , то КПД тепловой машины всегда меньше единицы. Отсюда вывод, что **тепло нельзя превратить в работу без необратимых потерь.**

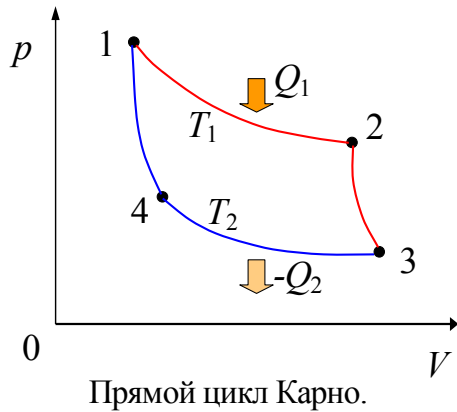
## 18.2. ЦИКЛ КАРНО

В природе и технике существует бесконечное количество циклов. Но тогда возникает вопрос, какой цикл из всех существующих циклов является самым экономичным, т.е. какой цикл имеет наибольший коэффициент полезного действия (КПД)? Такой цикл был предложен французским инженером Карно в 1824 г. Циклом Карно называется цикл тепловой машины, которая



связана только с двумя тепловыми резервуарами: нагревателем и холодильником.

Цикл Карно состоит из двух равновесных изотермических процессов и двух равновесных адиабатических процессов. В качестве рабочего тела используется идеальный газ. Тепловую машину, работающую по циклу Карно, называют машиной Карно или идеальной тепловой машиной.



1–2: изотерма – от нагревателя получено тепло  $Q_1$ .

2–3: адиабата – расширение, тепло не подводится.

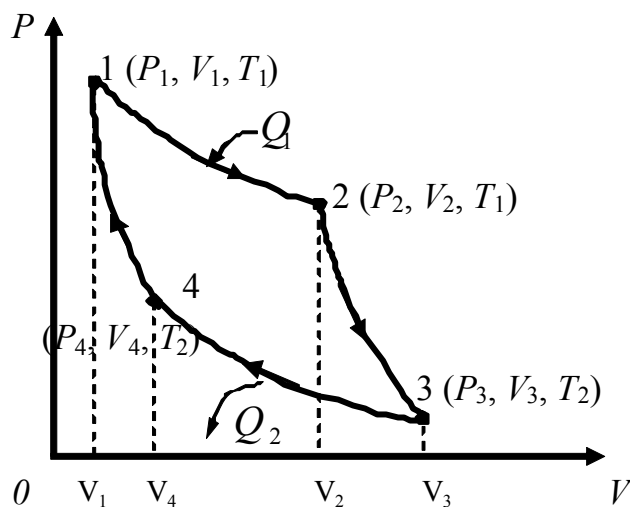
3–4: изотерма – тепло  $Q_2$  передаётся холодильнику.

4–1: адиабата – сжатие, тепло не подводится.

Рассмотрим прямой цикл Карно с идеальным газом. Цикл Карно состоит из четырех процессов: двух изотерм и двух адиабат.

1) Пусть сначала газ находится в состоянии 1, которое характеризовалось давлением  $P_1$ , объемом  $V_1$  и температурой  $T_1$ :  $V_1, T_1, P_1$  – начальные параметры рабочего тела. Заставим газ изотермически расширяться до тех пор, пока его параметры станут равными  $V_2, T_1, P_2$  (направление процессов показаны стрелкой). Температура  $T_1$  при изотермическом процессе не меняется и изменение внутренней энергии газа  $\Delta U$  при этом процессе тоже равно нулю. Чтобы газ изотермически расширялся, он должен получить от нагревателя количество теплоты  $Q_1$ . При изотермическом процессе количество теплоты  $Q_1$  равно работе расширения, совершаемой газом при переходе из состояния 1 в состояние 2:

$$Q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}.$$



2) Из состояния 2 заставим газ адиабатически расширяться до состояния 3, где его параметры станут равными  $P_3, V_3$ , а температура примет значение  $T_2 < T_1$ . Падение температуры связано с работой газа при адиабатном расширении. При адиабатном процессе к газу тепло не подводится, и газ совершает работу за счет своей внутренней энергии, в

результате газ охлаждается.

3) Из состояния 3 начнем сжимать изотермически газ до состояния 4, характеризуемого параметрами  $V_4$ ,  $P_4$  и  $T_2$ . Над газом совершается работа. При изотермическом процессе  $\Delta U = 0$  и чтобы внутренняя энергия рабочего тела, т.е. идеального газа, не изменилась, тело должно отдавать какое-то количество тепла  $Q_2$  холодильнику:

$$- Q_2 = RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} \quad \text{или} \quad Q_2 = RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}.$$

4) Из состояния 4 адиабатно сжимаем газ так, чтобы он принял исходные параметры  $V_1$ ,  $T_1$ ,  $P_1$ , т.е. вернулся в состояние 1. Над газом совершается работа, газ нагревается до температуры  $T_1$ , так как теплоотдачи при адиабатическом процессе нет. Находим КПД цикла Карно:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}.$$

Для двух адиабат 2–3 и 4–1 цикла Карно запишем их уравнения:

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1} \quad \text{и} \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}.$$

Делим почленно первое уравнение на второе, получим:

$$\left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} = \left( \frac{V_3}{V_4} \right)^{\gamma-1} \quad \text{или} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}.$$

Подставив это выражение в формулу для КПД, и произведя необходимые сокращения, имеем:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где  $T_1$  – температура нагревателя,  $T_2$  – температура холодильника. Обе температуры определяются по шкале Кельвина.

Обратим внимание, что изотермический и адиабатический процессы в цикле Карно являются равновесными и, следовательно, обратимыми. Поэтому цикл Карно в целом обратим.

Цикл Карно является единственным равновесным и обратимым циклом среди всех возможных циклов, совершаемых при наличии нагревателя и холодильника. Действительно, процесс теплообмена с окружающей средой должен быть изотермическим, потому что только при этих условиях температура рабочего тела и нагревателя совпадают (это же можно сказать и про холодильник). Так как температуру рабочего тела необходимо периодически изменять, то в процессе изменения температуры рабочее тело должно быть изолировано от окружающей среды

(от нагревателя и холодильника). Следовательно, изменение температуры возможно только при адиабатическом процессе. Итак, равновесный цикл тепловой машины при наличии нагревателя и холодильника должен состоять из двух изотерм и двух адиабат.

Сформулируем некоторые выводы.

1. При данных нагревателе и холодильнике можно осуществить обратимые циклы Карно с помощью различных машин, имеющих, например, различные рабочие тела. Так как КПД машины, работающей по циклу Карно определяется только температурой нагревателя и температурой холодильника  $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ , то **обратимые машины, рабо-**

**тающие по циклу Карно, имеют одинаковый коэффициент полезного действия.** Это утверждение носит название **первой теоремы Карно.** Другими словами первая теорема Карно может быть сформулирована следующим образом: коэффициент полезного действия цикла Карно не зависит от природы рабочего тела и конструктивных особенностей машины.

2. Рассмотрим тепловую машину, которая совершает произвольный (обратимый или необратимый) круговой процесс, обмениваясь теплом только с нагревателем и холодильником при температурах  $T_1$  и  $T_2$ . **Вторая теорема Карно утверждает, что КПД любой тепловой машины, обменивающейся теплом только с нагревателем при температуре  $T_1$ , и холодильником при температуре  $T_2$  не может быть больше КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно с теми же температурами нагревателя и холодильника.**

Тогда, зная что коэффициент любой тепловой машины равен  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ , а коэффициент машины, работающей по циклу Карно равен

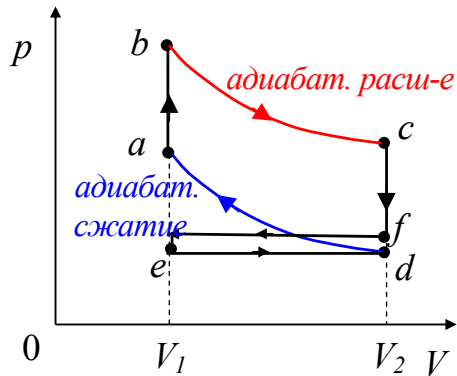
$\eta_k = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$  и коэффициент машины, работающей по циклу Карно все-

гда больше, чем коэффициент полезного действия любой машины  $\eta_k > \eta$ , имеем:  $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ .

По циклу Карно работает *машина Карно* – самая эффективная тепловая машина, у которой теоретический КПД много больше, чем КПД любой другой машины, работающей по любому циклу (например, двигатель внутреннего сгорания).

Четырёхтактный бензиновый автомобильный двигатель.





Четырёхтактный т.к. в течение каждого полного цикла поршень дважды находится в крайнем нижнем и дважды в крайнем верхнем положении.

$a$  – сжатая воздушно-горючая смесь поджигается свечой зажигания.

$a$ – $b$ : после воспламенения давление резко возрастает.

$c$  – адиабатическое расширение закончено, открывается выпускной клапан.

$c$ – $f$ : нагретый сжатый газ быстро вытекает через выпускной клапан.

$f$ – $e$  – поршень выталкивает остатки отработанной смеси, выпускной клапан закрывается, а впускной открывается.

$f$ – $d$  – свежая порция воздушно-горючей смеси наполняет цилиндр, впускной клапан закрывается.

$d$ – $a$ : свежая порция смеси сжимается адиабатически.

В идеальном цикле считается, что точки  $f$  и  $d$  совпадают, путь  $fe$  и  $ed$  совпадают и никакой работы на пути  $fed$  не совершается. Тогда КПД

цикла по определению:  $\eta = \frac{A}{\Delta Q_{ab}}$ ,

$A$  – полная механическая работа, совершаемая двигателем за 1 цикл,  $\Delta Q_{ab}$  – теплота сгорания топлива, потребляемого за 1 цикл. Выполнив

несложные преобразования, получим:  $\eta = 1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$ . Величина  $\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$

называется степенью сжатия. Чем больше степень сжатия, тем выше КПД.

Теоретическое значение  $\eta = 0,56$  для степени сжатия  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{8}$  и  $\gamma = 1,4$ .

Сравнение машины Карно с двигателем внутреннего сгорания.

При горении бензина  $T_1 \sim 2700$  К; холодильник – окружающий воздух  $T_2 \sim 300$  К.

К.п.д.  $\eta_{\text{Карно}} = \frac{2700 - 300}{2700} = 0,89$ .

К.п.д. тепловых электростанций (если считать, что работают по циклу Карно):

$T_1 = 373$  К – кипение воды,

$T_2 = 273$  К – замерзание воды,

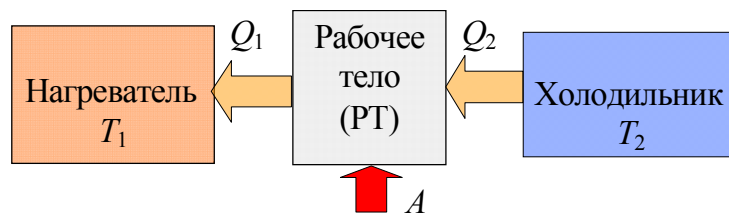
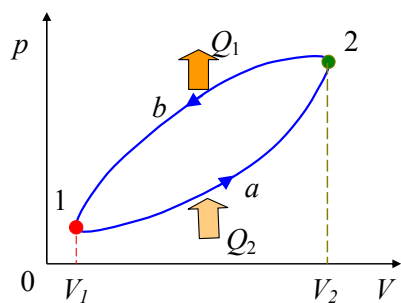
$\eta = \frac{373 - 273}{373} = 0,27$  – очень маленький.

Необходимо повышать  $T_1$ , т.е. воду нагревать под давлением. Следовательно, она будет закипать при более высокой  $T_1 \approx 500 \text{ К}$  и  $\eta \geq 40\%$ .

### 18.3. ОБРАТНЫЙ ЦИКЛ. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Тепловую машину, работающую по циклу Карно, можно запустить в обратном направлении за счет совершения над ней работы. В этом случае тепловая машина работает как холодильная машина. Для приведения машины в действие требуется совершить над ней работу  $A_{\text{внеш}}$ , равную по абсолютной величине и противоположную по знаку работе  $A$ , которую производит машина при её работе по прямому циклу.

Отличительной особенностью холодильной машины является то, что температура рабочего тела в процессе его сжатия выше, чем в процессе расширения. Благодаря этому теплота  $Q_2$  отбирается от менее нагретых тел и передается более нагретым телам  $Q_1$ . Холодильная машина работает по обратному циклу.



1a2: расширение рабочего тела с поглощением  $Q_2$ ,  
2b1: сжатие рабочего тела с передачей нагревателю  $Q_1$ .

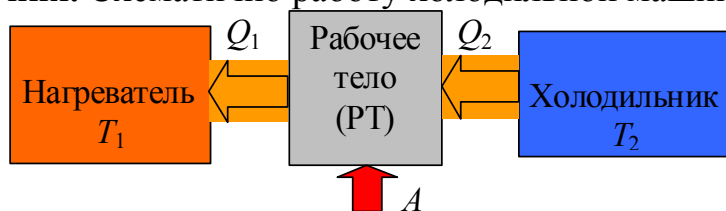
$Q_2$  – тепло отнятое от холодного тела.  
 $Q_1$  – тепло переданное нагревателю (более горячему телу).  
 $A = Q_2 - Q_1$  – работа, затрачиваемая на передачу тепла от более холодного к более горячему телу.

Пусть рабочее тело перешло из состояния 1 в состояние 2 по кривой 1a2 (направления процессов показаны на рисунке стрелкой). Кривая 1a2 – это кривая расширения газа. Газ сам совершает работу  $A_2$ , графически выражаемую площадью под кривой 1a2  $A_2 > 0$ . Сжатие газа происходит по кривой 2b1. Работа  $A_1$  графически выражается площадью под кривой 2b1. Графически суммарная работа выражается площадью петли цикла и равна  $A_1 - A_2$ . Суммарная работа, совершенная в результа-

те этого цикла равна разности работ по расширению и сжатию рабочего тела:

$$-A = A_2 - A_1 < 0,$$

так как по абсолютному значению  $|A_1| > |A_2|$ . Так как суммарная работа отрицательна ( $A < 0$ ), то получается, что не рабочее тело совершило работу против внешних сил, а наоборот, внешние силы совершили работу над телом. Для приведения машины в действие внешние силы должны совершить положительную работу  $A_{внеш}$ , равную по абсолютной величине и противоположную по знаку работе  $A$ :  $A_{внеш} = -A$ . Таким образом система преобразует работу в теплоту: в одной части цикла в систему поступает теплота, а в другой – система отдает теплоты больше, чем получает. Сама же система возвращается в начальное состояние. Таким образом, результат цикла состоит в том, что тело с меньшей температурой, от которого система получает тепло, охлаждается. А тело с большей температурой, которому тело отдает тепло, нагревается. Такая машина, работающая по обратному циклу, называется **холодильной машиной или нагревателем (тепловым насосом) в зависимости от назначения**. Схематично работу холодильной машины можно представить так:



Обратным циклом называется цикл, на осуществление которого расходуется работа со стороны внешних по отношению к системе сил.

Если  $Q_2$  – количество теплоты, полученное рабочим телом при расширении, а  $(-Q_1)$  – количество теплоты, отданное им при сжатии, то записав первое начало термодинамики для цикла:  $Q = \Delta U + A$ , но  $\Delta U = 0$ , потому, что система вернулась в начальное состояние, тогда  $Q = A$ , где

$$-Q_1 = U_2 - U_1 - A_1,$$

$$Q_2 = U_1 - U_2 + A_2$$

и сложив, правые и левые части этих уравнений, получим:

$$Q_2 - Q_1 = A_2 - A_1 = -A, \text{ тогда } Q_1 = Q_2 + A$$

Эффективность машины, работающей по обратному циклу, характеризуется двояко в зависимости от назначения.

Эффективность машины можно оценить по способности повышения температуры тела с более высокой температурой  $T_1$ . В таком случае машина действует как **нагреватель (тепловой насос)**. Её эффективность характеризуется коэффициентом, который определяется от-

ношением количества теплоты, переданного на нагревание, к затраченной на это работе внешних сил:  $\xi_1 = \frac{|Q_1|}{|A_{внеш}|} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{1}{1 - (T_2/T_1)} = \frac{1}{\eta}$ .

Эффективность машины можно оценить по способности понижения температуры тела с более низкой температурой  $T_2$ . В таком случае машина действует как **холодильная машина**. Её эффективность характеризуется коэффициентом, который определяется отношением количества теплоты отнятого у холодного тела к затраченной на это работе внешних сил:  $\xi_2 = \frac{|Q_2|}{|A_{внеш}|} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{1}{\eta} - 1$ .

Пример 1. Рассчитаем эффективность холодильной машины в таких условиях: в помещении необходимо поддерживать температуру  $18^{\circ}\text{C}$ , температура наружного воздуха  $35^{\circ}\text{C}$ , причём количество теплоты, выделяемой людьми и всеми агрегатами, находящимися в помещении в единицу времени равна  $418 \text{ Вт}$ :  $\xi_2 = \frac{|Q_2|}{|A_{внеш}|} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{291}{17} = 17,1$ .

Следовательно мощность холодильной машины (работа внешних сил в единицу времени), обеспечивающей такую температуру в помещении должна быть  $P_{\text{холод}} = \frac{Q_2}{\xi_2} = 24,4 \text{ Вт}$ .

Пример 2. Рассчитаем эффективность машины, работающей как тепловой насос в таких условиях: в помещении необходимо поддерживать температуру  $35^{\circ}\text{C}$ , температура наружного воздуха  $18^{\circ}\text{C}$ , причём количество теплоты, выделяемой людьми и всеми агрегатами, находящимися в помещении в единицу времени равна  $418 \text{ Вт}$ :  $\xi_1 = \frac{|Q_1|}{|A_{внеш}|} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = 18,1$ . Следовательно, мощность теплового насоса (работа внешних сил в единицу времени), обеспечивающей такую температуру в помещении должна быть  $P_{\text{тепл.нас}} = \frac{Q_1}{\xi_1} = 23,09 \text{ Вт}$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой процесс называется круговым процессом?
2. Какой цикл называется прямым циклом?
3. Какая машина называется тепловой машиной?  
Начертите схему действия тепловой машины.

4. Чему равен коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины?
5. Начертите в координатах  $P, V$  прямой цикл Карно. Из каких процессов он состоит?
6. Чему равен КПД прямого цикла Карно?
7. Начертите схему идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно.
8. Начертите в координатах  $P, V$  обратный цикл Карно.
9. Начертите схему идеальной холодильной машины.
10. Какой цикл называется обратным циклом?
11. Какая машина называется холодильной машиной? Начертите схему действия холодильной машины.