

Лекция 1-13. Тепловые двигатели

Введение

Важнейшая область применения термодинамики - разработка, создание и постоянное совершенствование тепловых двигателей: паровых, внутреннего сгорания, турбовинтовых, ракетных, и др.

§1. Адиабатный процесс

Адиабатным называется процесс, происходящий в системе без теплообмена с окружающей средой.

Уравнение Пуассона. Получим уравнение такого процесса как зависимость давления газа от объема $p = f(V)$. Для упрощения записи возьмем газ в количестве одного моля, тогда уравнение Менделеева–Клапейрона примет вид $pV = RT$. Продифференцируем его обе части по температуре

$$\frac{d(pV)}{dT} = p \frac{dV}{dT} + V \frac{dp}{dT} = R \text{ и получим } pdV + Vdp = RdT.$$

С другой стороны первый закон термодинамики для адиабатного процесса $\delta Q = dW_{\text{вн}} + \delta A = 0$, так как нет теплопередачи по определению рассматриваемого процесса, или $c_{vV}dT + pdV = 0$. Отсюда

$$dT = \frac{-pdV}{c_{vV}}.$$

Подставляя эту формулу в выражение, полученное из уравнения Менделеева–Клапейрона, имеем

$$pdV + Vdp = R \frac{-pdV}{c_{vV}}. \text{ Или } pdV + R \frac{pdV}{c_{vV}} + Vdp = 0.$$

Вынесем в правой части за скобку pdV , получим $pdV \left(1 + \frac{R}{c_{vV}} \right) + Vdp = 0$.

Выражение в скобках равно $\left(1 + \frac{R}{c_{vV}} \right) = \frac{c_{vV} + R}{c_{vV}} = \frac{c_{vP}}{c_{vV}} = \gamma$ в соответствии с формулой Майера. В результате получилось диффе-

ренциальное уравнение с разделяющимися переменными $\gamma p dV = -V dp$, интегрирование которого $\gamma \int \frac{dV}{V} = - \int \frac{dp}{p} + const$ приводит к формуле $\gamma \ln V + \ln p = const$. Потенцируя, окончательно получаем уравнение адиабатного процесса $pV^\gamma = const$, которое называется уравнением Пуассона. Используя уравнение Менделеева–Клапейрона, его можно переписать для других пар термодинамических координат $TV^{\gamma-1} = const$ и $Tp^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = const$ (сделать самостоятельно!).

Работа газа в адиабатном процессе численно равна площади под графиком адиабаты в координатах (p, V) и определяется по формуле $A = \int_1^2 p dV$, где зависимость давления от объема

определяется уравнением Пуассона $pV^\gamma = const$. Тогда

$$A = \int_1^2 p dV = const \int_1^2 \frac{1}{V^\gamma} dV = const \left. \frac{1}{1-\gamma} V^{1-\gamma} \right|_1^2 = \\ = \frac{1}{\gamma-1} \left(\frac{const}{V_1^{\gamma-1}} - \frac{const}{V_2^{\gamma-1}} \right) = \{ \text{умножим уравнение Менделеева-}$$

Клапейрона на $V^{\gamma-1}$ слева и справа: $pV \cdot V^{\gamma-1} = \frac{m}{M} RT \cdot V^{\gamma-1}$ или

$$pV^\gamma = \frac{m}{M} RT V^{\gamma-1} = const = p_1 V_1^\gamma = \frac{m}{M} RT_1 V_1^{\gamma-1} = p_2 V_2^\gamma = \frac{m}{M} RT_2 V_2^{\gamma-1}$$

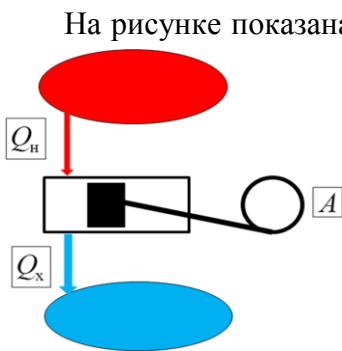
согласно уравнению Пуассона; заменяя константу на равные ей выражения, получим}

$$= \frac{1}{\gamma-1} \left(\frac{m}{M} \frac{RT_1 V_1^{\gamma-1}}{V_1^{\gamma-1}} - \frac{m}{M} \frac{RT_2 V_2^{\gamma-1}}{V_2^{\gamma-1}} \right) = \frac{1}{\gamma-1} \frac{m}{M} R(T_1 - T_2) =$$

{преобразуем дробь $\frac{1}{\gamma-1} = \frac{1}{\frac{c_{vP}}{c_{vV}} - 1} = \frac{c_{vV}}{c_{vP} - c_{vV}} = \frac{c_{vV}}{R}$, где учтено

уравнение Майера $c_{vp} - c_{vV} = R$, и окончательно получим $\} = \frac{m}{M} c_{vV} (T_1 - T_2)$. Полученная формула совершенно понятна, если вспомнить первый закон термодинамики и определение адиабатного процесса. Из формулы видно, что работа совершается только за счет убыли внутренней энергии.

§2. Цикл Карно



На рисунке показана общая схема работы теплового двигателя. Это устройство получает теплоту из теплового резервуара (нагревателя), часть теплоты преобразует в механическую работу, а оставшуюся часть передает холодильнику. Очевидно, что температура нагревателя выше температуры холодильника (иначе невозможна теплопередача).

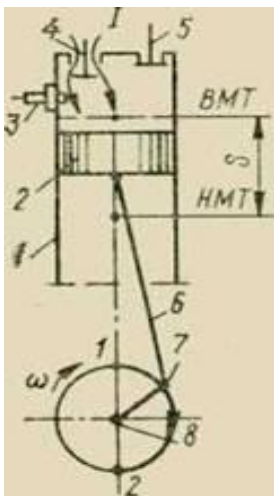
Коэффициент полезного действия такого устройства (тепловой машины) определяется формулой (с учетом закона сохранения энергии)

$$\eta = \frac{A}{Q_n} = \frac{Q_n - |Q_x|}{Q_n}.$$

Из формулы видно, что к.п.д. двигателя всегда будет меньше единицы (меньше 100%).

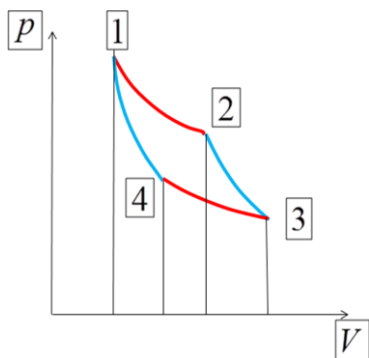
Наибольшее распространение получили двигатели внутреннего сгорания. Одним из первых указал на возможность создания ДВС Сади Карно в своей работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824 г.).

В 1877 г. немецкий инженер *Otto* построил бензиновый двигатель, работа



которого осуществлялась по принципу, запатентованному французом Бо-де-Роша в 1862 г. В 1897 г. немецкий инженер *Дизель* разработал двигатель, работающий на керосине, который распылялся в цилиндре воздухом высокого давления от компрессора. В 1904 г. русским инженером *Тринклером Г.В.* был построен безкомпрессорный двигатель со смешанным сгоранием топлива. Этот двигатель получил самое широкое распространение во всем мире.

Наибольшим теоретически возможным при данных температурах нагревателя и холодильника коэффициентом полезного действия «обладает» так называемая идеальная тепловая машина,



на, в которой реализуется цикл Карно: цикл, состоящий из сменяющих друг друга четырех тепловых процессов (см. рис.): двух изотермических (1-2 и 3-4) и двух адиабатных (2-3 и 4-1).

Работа, совершаемая рабочим телом (газом) на каждом из участков цикла, определяется формулами:

$$A_{12} = Q_{\text{н}} > 0, \quad A_{23} = -\Delta W_{\text{вн}23} > 0$$

$$A_{34} = Q_{\text{х}} < 0, \quad A_{41} = -\Delta W_{\text{вн}41} < 0$$

Напомним, что работа газа на каждом участке цикла численно равна площади под графиком. Подставляя формулы для работ в изотермических процессах A_{12} и A_{34} в выражение для КПД тепловой машины, для цикла Карно получим:

$$\eta = \frac{A}{Q_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{н}} - |Q_{\text{х}}|}{Q_{\text{н}}} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}}.$$

Литература.

1. Матвеев А. Н. Молекулярная физика, М., Высш. шк., 1987
2. Трофимова. Курс физики
3. Савельев. Курс физики, т. 1