

### Задание 10-3. Не хуже Карно ..?

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС), работающие по различным термодинамическим циклам, успешно работают в современном мире. Миллионы машин используют как бензиновые, так и дизельные ДВС, а доля электромобилей на мировом рынке в настоящий момент крайне невелика – около 2 %.



Рис. 1

При создании ДВС в середине XIX века перед инженерами и конструкторами встал важный прикладной (и научный!) вопрос: а какой тепловой двигатель имеет максимальный термодинамический КПД, т.е. является идеальной тепловой машиной?

Заметим, что цикл Отто (бензиновый двигатель) и цикл Дизеля (дизельный двигатель) не являются идеальными тепловыми циклами, хотя автомобили, работающие по этим циклам, и составляют львиную долю современного производства.

Идеальная тепловая машина была описана в 1824 г. французским физиком и инженером Сади Карно (Рис. 1) в работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу».

Идеальный цикл Карно (Рис. 2), состоящий из двух изотерм и двух адиабат, сегодня известен каждому школьнику.

В данном задании мы немного «пофантазируем» и предложим свой цикл, который также использует элементы знаменитого цикла Карно.

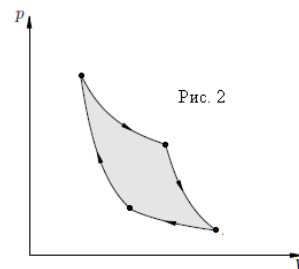


Рис. 2

*Справочные данные и параметры рассматриваемой системы:* если  $a^n b^m = \text{const}$ , то при малых  $\Delta a$  и  $\Delta b$  ( $\Delta a \ll a$ ,  $\Delta b \ll b$ ) справедливо равенство:  $n \frac{\Delta a}{a} + m \frac{\Delta b}{b} = 0$  (справедливо также и обратное утверждение); молярная газовая постоянная  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

#### Часть 1. Адиабатный процесс

Термодинамический процесс, проводимый без теплообмена ( $Q = 0$ ) с окружающей средой (т.е. в теплоизолированной системе), называется *адиабатным* процессом. Адиабатными являются многие быстропротекающие процессы (взрыв, быстрое расширение (сжатие) газа, распространение звуковой волны), процесс подъема теплого воздуха с поверхности земли с последующим охлаждением, конденсацией пара и образованием облаков и т.д.

**1.1** Теплоёмкость  $c^M$  идеального газа, взятого в количестве  $\nu = 1$  моль ( $m = M$ ), называется молярной теплоёмкостью. Найдите молярную теплоёмкость  $c_V^M$  идеального одноатомного газа при изохорном процессе, т.е. при постоянном объёме ( $V = \text{const}$ ). Запишите формулу для внутренней энергии  $U$  идеального одноатомного газа через  $c_V^M$  и в дальнейшем используйте её для любого идеального газа.

**1.2** Выразите молярную теплоёмкость идеального газа  $c_p^M$  при постоянном давлении ( $p = \text{const}$ ), т.е. при изобарном процессе, через  $c_V^M$ .

**1.3** Получите уравнение адиабатного процесса для произвольного идеального газа в переменных  $(T, V)$  с показателем адиабаты  $\gamma = \frac{c_p^M}{c_V^M}$ .

**1.4** В полученном уравнении сделайте замену переменных и запишите уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона) для произвольного идеального газа в «традиционном» виде, т.е. в переменных  $(p, V)$ .

**1.5** Схематически изобразите на одной  $(p, V)$  – диаграмме ход адиабаты и изотермы идеального газа. Кратко охарактеризуйте особенности построенных графиков.

## Часть 2. Цикл с адиабатой

С идеальным одноатомным газом провели циклический процесс  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$  (Рис. 3), состоящий из изобары  $A \rightarrow B$ , изохоры  $B \rightarrow C$  и адиабаты  $C \rightarrow A$ .

**2.1** Укажите участки цикла, на которых работал нагреватель, т.е. газ получал теплоту от внешнего источника. Найдите количество теплоты  $Q_1$ , переданное рабочему телу от нагревателя в данном цикле.

**2.2** Используя ранее полученные результаты, найдите давление  $p_C$  газа в состоянии  $C$ .

**2.3** Укажите участки цикла, на которых работал холодильник, т.е. газ отдавал теплоту внешнему источнику. Найдите количество теплоты  $Q_2$ , отданное рабочим телом холодильнику в данном цикле.

**2.4** Выведите формулу для термодинамического КПД  $\eta$  данного цикла. Как значение  $\eta$  зависит от параметров  $V_A$  и  $p_A$  термодинамической системы в начальном состоянии? Как, по вашему мнению, это можно объяснить?

**2.5** Чему равен максимально возможный термодинамический КПД  $\eta_{max}$  описанного цикла?

**2.6** На Рис. 4 изображен подобный процесс в безразмерных (относительных) координатах объема и давления  $(V/V_0; p/p_0)$ , где  $V_0$  и  $p_0$  – некоторые неизвестные размерные масштабные множители. Вычислите термодинамический КПД  $\eta_1$  цикла, изображенного на Рис. 4.

