

Задание 3. Машина по изготовлению льда

Юный экспериментатор Федя, изучив основы термодинамики, понял, что в силах своими руками собрать тепловую машину, а точнее, холодильную машину. Своей целью юный физик поставил, используя собственную физическую силу, получить из воды лёд. В качестве основы своей установки он взял теплоизолированную цилиндрическую ёмкость с поршнем (рис. 1). Передвигая поршень, можно изменять объём сосуда от $V_1 = 5,0$ л до $V_2 = 7,0$ л. Площадь поршня $S = 80$ см². При необходимости с сосуда можно снять изоляцию и открыть теплообмен с окружающим воздухом. Вода массой $m = 0,20$ кг в стакане, теплоемкостью которого можно пренебречь, помещена в сосуд и отделена от всего объёма теплоизолирующей перегородкой, которую можно открывать при необходимости. Объёмом газа с водой, отделенного перегородкой, можно пренебречь. Рабочим телом Василий выбрал некоторый двухатомный идеальный газ. Перед началом работы машины объём сосуда минимален, газ находится при комнатной температуре $T_{\text{комн}} = 20^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении $p_0 = 101$ кПа.

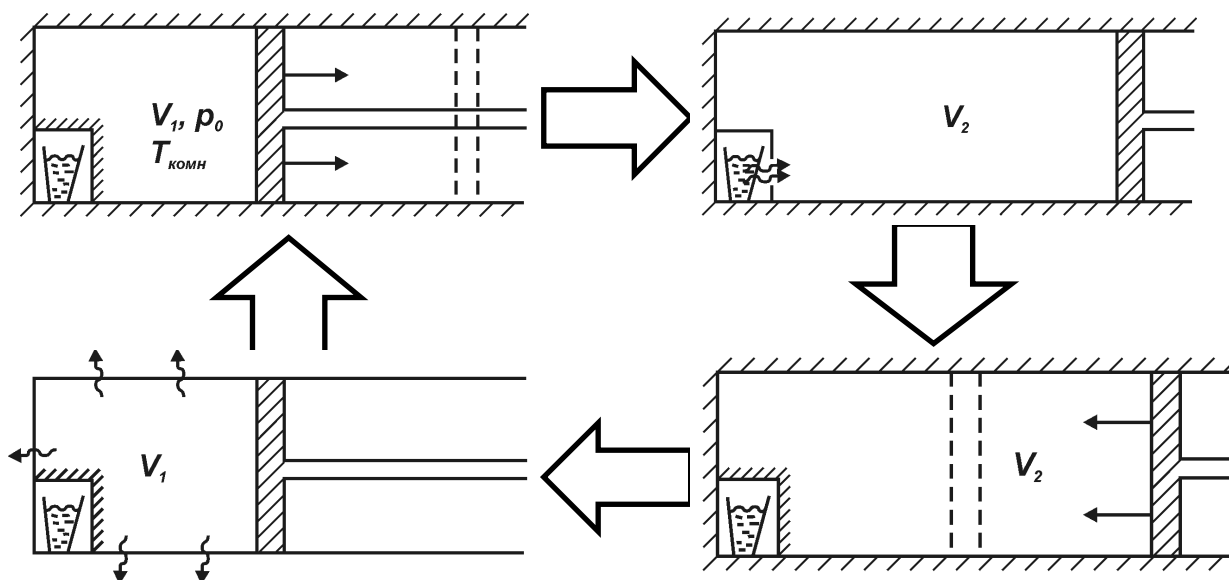
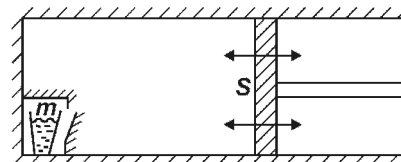


Рисунок 2

Холодильный циклический процесс, придуманный Федей, состоит из четырёх этапов (рис. 2). На первом этапе сосуд теплоизолирован, вода внутри изолирована от рабочего газа, и Федя, прикладывая свои усилия к поршню, увеличивает объём газа с V_1 до V_2 . На следующем этапе, при постоянном объёме V_2 , открывают перегородку внутри сосуда и позволяют происходить теплообмену воды (льда) с газом до установления теплового равновесия. На третьем этапе Федя вновь закрывает перегородку и, своими усилиями перемещая поршень, уменьшает объём сосуда до исходного V_1 . Наконец, на четвёртом этапе, при постоянном объёме V_1 , с сосуда снимают изоляцию и позволяют происходить теплообмену с окружающей средой до наступления теплового равновесия.

. Адиабатический процесс, то есть процесс в отсутствие теплообмена, для идеального газа протекает таким образом, что произведение $TV^{\gamma-1}$ остаётся постоянным ($TV^{\gamma-1} = \text{const}$). Безразмерная величина γ называется показателем адиабаты и зависит от свойств газа.

1. Подготовка

В этой части вам предлагается найти некоторые величины, которые могут пригодиться для дальнейшего решения.

- 1.1. Найдите химическое количество ν используемого газа.
- 1.2. До какого минимального объёма $V_{2 \min}$ нужно «растягивать» газ на первом этапе, чтобы получение льда из воды описанным способом было возможным?

2. Кристаллизация

Пусть изначально вода в стакане имела температуру 0°C .

- 2.1. Постройте качественную (то есть без точных чисел) диаграмму происходящего процесса в p - V координатах.
- 2.2. Найдите массу льда Δm , образующегося за один цикл.
- 2.3. Сколько циклов n необходимо провести, чтобы заморозить всю воду в стакане?
- 2.4. Какую работу A совершает Федя за один цикл?
- 2.5. Предложите разумное определение коэффициента полезного действия холодильной машины. Рассчитайте КПД η данного процесса в соответствии с предложенным определением.
- 2.6. Какую максимальную силу F_{\max} должен приложить Федя к поршню в течение процесса? Какой средний модуль силы $F_{\text{ср}}$ прикладывает Федя за один цикл? Считайте, что ускорение поршня пренебрежимо мало.

3. Охлаждение и кристаллизация

Теперь рассмотрим более практичный случай, когда вода изначально находится при комнатной температуре $T_{\text{комн}}$.

- 3.1. Качественно изобразите несколько последовательных циклов данного процесса на p - V диаграмме.
- 3.2. Пусть в начале очередного цикла вода находится при некоторой температуре $T_n > T_{\text{л}}$. За этот цикл вода охладится до некоторой температуры T_{n+1} . Определите зависимость $T_{n+1}(T_n)$.
- 3.3. Какое количество циклов необходимо провести, чтобы охладить всю воду до температуры замерзания? Сколько всего циклов с начала процесса должно быть проведено для обращения в лёд всей воды?
- 3.4. Согласно предложенному определению (п. 2.5 задачи) определите КПД процесса охлаждения воды.
- 3.5. Какую полную работу необходимо совершить Феде, чтобы всю изначальную воду превратить в лёд?

Справочные данные:

Характеристики воды: молярная масса $M = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$; плотность $\rho = 1,0 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
удельная теплоемкость $c_0 = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; удельная теплота испарения
 $L = 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; удельная теплота кристаллизации $\lambda = 3,3 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; температура
плавления льда $T = 0^\circ\text{C} = 273\text{K}$; поверхностное натяжение $\sigma = 7,3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$; давление
насыщенных паров воды при 25°C $p_{25} = 3,17 \cdot 10^3 \text{Па}$, при 18°C - $p_{18} = 2,07 \cdot 10^3 \text{Па}$.
Показатель адиабаты для двухатомного газа: $\gamma = 7/5$.

Универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$; постоянная Авогадро
 $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{моль}^{-1}$; атмосферное давление $P_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{Па}$;