

Задача 10-3 Цикл Ренкина

Несмотря на современное многообразие способов получения электроэнергии с помощью сжигания различных типов топлива, использования солнечного света или энергии ядерных реакции, в подавляющем большинстве электростанций указанного типа используются паросиловые установки. В таких установках энергия, получаемая в результате сжигания топлива или выделяемая во время радиоактивного распада, направляется на подогрев и вскипание воды, вследствие чего водяной пар вращает турбину электрогенератора. Термодинамические процессы в большинстве подобных механизмов происходят в соответствии с одной из вариаций цикла Ренкина.

Цикл Ренкина является термодинамическим циклом с двухфазным рабочим телом, то есть во время процесса которого осуществляется фазовый переход жидкости в пар и наоборот. Стоит также упомянуть, что холодильники и кондиционеры, использующие фреон, работают на основе обратного цикла Ренкина. В данной задаче вам предлагается изучить цикл Ренкина, рассматривая в качестве рабочего тела некоторую приближенную модель водяного пара.

В качестве модели будем считать, что водяной пар является идеальным газом, молярная теплоемкость которого при постоянном объеме равна $c_V = \frac{9}{2}R$, где R – универсальная газовая постоянная. Также считайте, что плотность воды в жидком состоянии постоянна, то есть не зависит ни от давления, ни от температуры.

Для решения задачи вам может пригодиться график зависимости давления насыщенного пара воды от температуры, представленный на отдельном бланке. При желании вы можете делать любые пометки и построения на данном графике. По окончании работы вложите данный бланк в тетрадь с решением. **Ни в коем случае не подписывайте бланк-вкладыш с графиком!**

Все процессы, происходящие с рабочим телом, считайте квазистационарными, то есть достаточно медленными. На некотором этапе рабочее тело будет совершать адиабатический процесс, то есть процесс без теплообмена с окружающей средой. Известно, в квазистационарном адиабатическом процессе с идеальным газом сохраняется величина $pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}$, то есть $pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = \text{const}$, где p – давление идеального газа, T – его температура, γ – показатель адиабаты, а «const» обозначает некоторую постоянную. Показатель адиабаты γ – безразмерная величина, для идеального газа равная отношению c_p/c_V теплоемкостей при

постоянном давлении и объеме, соответственно.

Наконец, напомним вам некоторые физические постоянные (никто не гарантирует, что все из них вам понадобятся):

Универсальная газовая постоянная: $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$

Постоянная Авогадро: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$

Постоянная Больцмана: $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}$

Молярная масса воды: $M = 1,80 \cdot 10^{-2} \text{ кг}/\text{моль}$

Удельная теплоемкость воды: $c_B = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$

Плотность воды: $\rho_B = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$

Нормальное атмосферное давление: $p_{\text{атм}} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$

Температура кипения воды при $p_{\text{атм}}$: $T_{\text{кип}} = 100 ^\circ\text{C} = 373 \text{ К}$

Удельная теплота парообразования воды при $100 ^\circ\text{C}$: $L_{100 ^\circ\text{C}} = 2,26 \text{ МДж}/\text{кг}$

Часть А. Пройдемся по циклу

В данной задаче с водой и водяным паром будет происходить следующий цикл, схематически изображенный на рисунке.

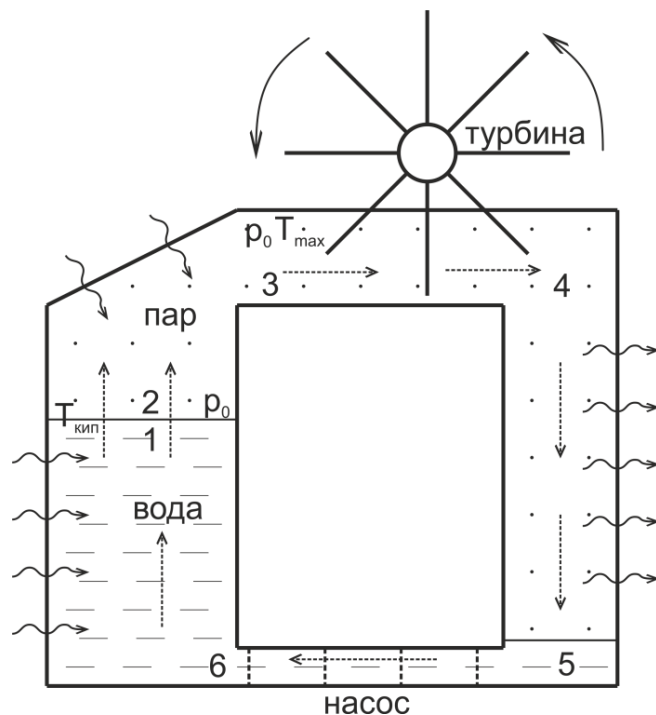


Рисунок 1 - Схема цикла

Первоначально (точка 1 на рисунке) вода находится в резервуаре при температуре кипения $T_{\text{кип}}$, а внешнее давление равно нормальному атмосферному $p_{\text{атм}}$. К воде подводится теплота, вследствие чего некоторая часть воды выкипает, превращаясь в водяной пар (точка 2). Получающийся водяной пар изобарно нагревают до температуры $T_{\text{max}} = 120^\circ\text{C}$ (точка 3). Далее разогретый пар адиабатически раскручивает турбину, вращая ротор электрогенератора. Параметры турбины подобраны таким образом, чтобы давление пара упало настолько, насколько это возможно при условии, чтобы пар еще не начал конденсироваться (точка 4). После этого в конденсаторе весь пар изотермически переводят в жидкое агрегатное состояние (точка 5). Наконец, полученную воду адиабатически насосом перекачивают в исходный резервуар (точка 6), после чего ее нагревают до температуры кипения $T_{\text{кип}}$ (точка 1), замыкая цикл.

A1. Получите выражение для количества теплоты, которое необходимо подвести, чтобы испарить некоторую порцию воды в процессе 1-2, в зависимости от массы m этой порции.

A2. Получите выражение для изменения внутренней энергии порции воды в процессе вскипания 1-2 в зависимости от массы m этой порции.

Далее вместо слов «в зависимости от массы m этой порции» будем просто указывать «(m)» после вопроса, где это необходимо.

A3. Получите выражение для количества теплоты, необходимой для изобарного нагревания полученной порции водяного пара до температуры $T_{\text{max}} = 120^\circ\text{C}$ в процессе 2-3. (m)

A4. Определите конечное давление пара после раскручивания турбины 3-4.

A5. Определите температуру конденсации в процессе 4-5.

A6. Получите выражение для количества теплоты, которая вода получила во время перекачивания и нагрева (процесс 5-6-1). (m)

Часть В. Исследуем цикл

B1. Схематически изобразите полученный цикл на диаграммах «давление-объем» (p - V) и «давление-температура» (p - T). Укажите на диаграммах точки 1, 2, ..., 6 согласно рисунку 1. Построение с точными числовыми значениями p и T не требуется.

В2. Определите удельную теплоту конденсации водяного пара в процессе 4-5. Также укажите разницу ΔL между удельной теплотой парообразования (конденсации) в процессах 1-2 и 4-5.

В3. Определите КПД приведенного цикла. Сравните его с КПД цикла Карно, работающего при той же максимальной и минимальной температуре.

