

-3 Цикл Ренкина

Условие

Задача 10-3 Цикл Ренкина

Несмотря на современное многообразие способов получения электроэнергии с помощью сжигания различных типов топлива, использования солнечного света или энергии ядерных реакций, 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):

$$pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = \text{const}$$

Универсальная газовая постоянная: $R = 8,31 \text{ Дж/(К·моль)}$ Постоянная Авогадро: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ Постоянная Больцмана: $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ Молярная масса воды: $M = 1,80 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$ Удельная теплоемкость воды: $c_B = 4200 \text{ Дж/(кг·°C)}$ Плотность воды: $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$ Нормальное атмосферное давление: $p_{\text{атм}} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ Температура

кипения воды при $p_{\text{атм}}$: $T_{\text{кип}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C} = 373\text{ K}$ Удельная теплота парообразования воды при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$: $L_{100\text{ }^{\circ}\text{C}} = 2,26\text{ МДж/кг}$

Часть А. Пройдемся по циклу

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

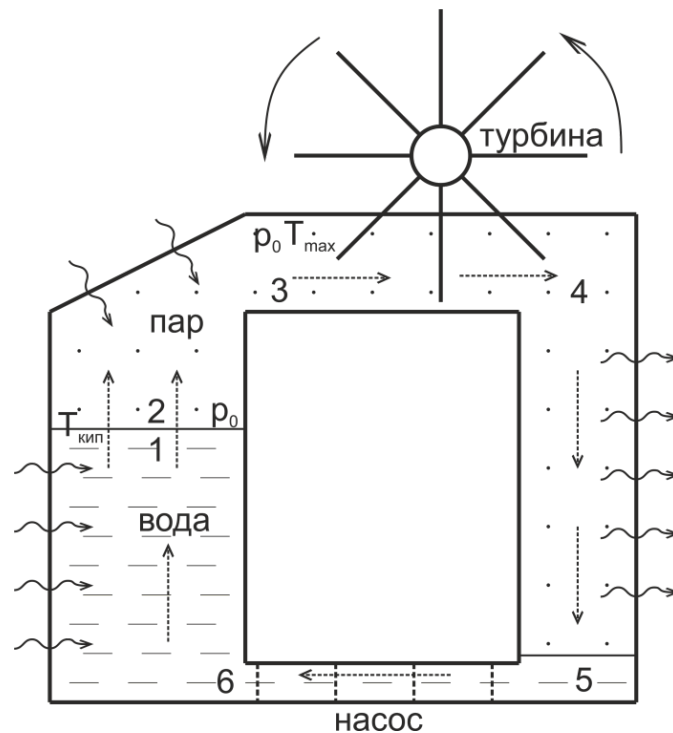


Рисунок 1 - Схема цикла

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 $T_{\text{max}} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (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.

А1. Получите выражение для количества теплоты, которое необходимо подвести, чтобы испарить некоторую порцию воды в процессе 1-2, в зависимости от массы m этой порции.

А2. Получите выражение для изменения внутренней энергии порции воды в процессе вскипания 1-2 в зависимости от массы m этой порции.

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

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

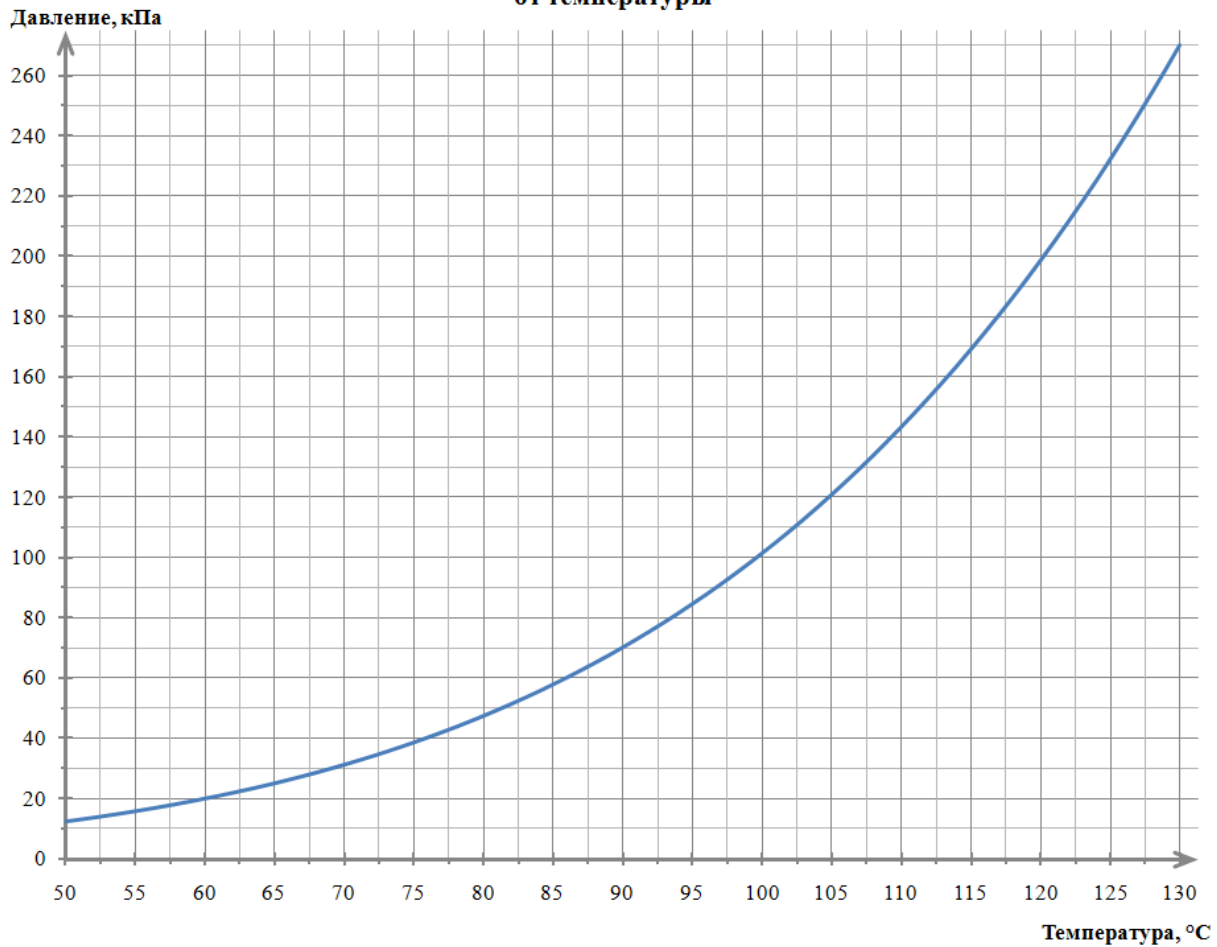
Часть В. Исследуем цикл

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. <u>Построение с точными числовыми значениями p и T не требуется.</u>

B2. 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.

B3. Определите КПД приведенного цикла. Сравните его с КПД цикла Карно, работающего при той же максимальной и минимальной температуре.

**Зависимость давления насыщенного пара воды
от температуры**



Решение

Задача 10-3 Цикл Ренкина.

Часть А. Пройдемся по циклу

А1. Количество теплоты, необходимое для испарения воды массы m , находящейся при температуре кипения, определяется известным выражением:

$$Q_{1-2} = L_{100^\circ\text{C}} m$$

А2. Согласно первому началу термодинамики $Q_{1-2} = A_{1-2} + \Delta U_{1-2}$. Так как кипение воды происходит при постоянном атмосферном давлении, то работу A_{1-2} можно рассчитать следующим образом:

$$A_{1-2} = p_{\text{атм}} (V_2 - V_1)$$

Объем воды V_1 в жидком состоянии можно найти, зная ее плотность. Объем водяного пара V_2 можно выразить из уравнения Менделеева-Клапейрона, где химическое количество выразим через массу и молярную массу:

$$A_{1-2} = p_{\text{атм}} \left(\frac{\nu R T_{\text{кип}}}{p_{\text{атм}}} - \frac{m}{\rho_{\text{в}}} \right) = m \left(\frac{R T_{\text{кип}}}{M} - \frac{p_{\text{атм}}}{\rho_{\text{в}}} \right)$$

Тогда изменение внутренней энергии порции воды:

$$\Delta U_{1-2} = Q_{1-2} - A_{1-2} = m \left(L_{100^\circ\text{C}} + \frac{p_{\text{атм}}}{\rho_{\text{в}}} - \frac{R T_{\text{кип}}}{M} \right)$$

А3. В этом пункте нам необходимо будет использовать выражение для внутренней энергии водяного пара. Для этого рассмотрим мысленный изохорный процесс с идеальным газом. По условию задачи нам известна молярная теплоемкость такого процесса, значит

$$Q_V = c_V \nu \Delta T = \frac{9}{2} \nu R \Delta T$$

С другой стороны, при изохорном процессе пар не совершает работы,

значит $Q_V = \Delta U$. Получаем, что изменение внутренней энергии равно $\Delta U = \frac{9}{2} \nu R \Delta T$. Зная, что при 0 К внутренняя энергия обращается в нуль, получаем выражение для внутренней энергии водяного пара: $\Delta U = \frac{9}{2} \nu R \Delta T$

$$U = \frac{9}{2} \nu R T$$

Процесс нагревания пара в задаче – изобарный, поэтому, воспользовавшись первым началом термодинамики и уравнением Менделеева-Клапейрона, можем получить:

$$Q_{2-3} = A_{2-3} + \Delta U_{2-3} = p_{\text{атм}}(V_3 - V_2) + \frac{9}{2} \nu R \Delta T_{2-3} = \nu R \Delta T_{2-3} + \frac{9}{2} \nu R \Delta T_{2-3} = \frac{11}{2} \nu R \Delta T_{2-3}$$

Полученный множитель $c_p = \frac{11}{2} R$ является молярной теплоемкостью водяного пара при

Полученный множитель $c_p = \frac{11}{2} R$ является молярной теплоемкостью водяного пара при постоянном давлении. Её можно было также получить, воспользовавшись формулой Майера: $c_p - c_V = R$. Используя молярную массу воды, получаем ответ на вопрос данного пункта:

$$Q_{2-3} = \frac{11}{2} \frac{m}{M} R (T_{\text{max}} - T_{\text{кип}})$$

А4. Как сказано в условии задачи, процесс раскручивания турбины будет происходить адиабатически. При этом будет изменяться и давление, и температура, и объем порции газа. Считая процесс квазистационарным, из условия знаем, что он подчиняется уравнению

$$pT^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = const$$

Показатель адиабаты γ мы можем рассчитать, используя выражения для теплоемкостей из предыдущего пункта задачи:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\frac{11}{2}R}{\frac{9}{2}R} = \frac{11}{9}$$

То есть адиабатический процесс будет происходить в соответствии с уравнением

$$pT^{-\frac{11}{2}} = const. \text{ Зная давление } (p_{\text{атм}}) \text{ и температуру } (T_{\text{max}}) \text{ в начале процесса,}$$

можем получить зависимость давления от температуры в явном виде:

$$pT^{-\frac{11}{2}} = const$$

$$pT^{-\frac{11}{2}} = p_{\text{атм}}T_{\text{max}}^{-\frac{11}{2}} \Rightarrow p = p_{\text{атм}} \left(\frac{T}{T_{\text{max}}} \right)^{\frac{11}{2}}$$

$$pT^{-\frac{11}{2}} = p_{\text{атм}}T_{\text{max}}^{-\frac{11}{2}} \Rightarrow p = p_{\text{атм}} \left(\frac{T}{T_{\text{max}}} \right)^{\frac{11}{2}}$$

Процесс будет происходить до тех пор, пока пар не начнет конденсироваться. Пар начинает конденсироваться, если его давление «попытается» превысить давление насыщенного водяного пара при текущей температуре. Тогда для нахождения конечного давления изобразим кривую зависимости $p(T)$ адиабатического процесса на графике зависимости давления насыщенного пара от температуры на бланке к условию задачи. Для этого рассчитаем давление в нескольких точках, не забывая, конечно, перевести температуру в абсолютную шкалу (Кельвины). Результаты расчетов представим в виде таблицы.

$T, ^\circ\text{C}$	50	60	70	80	90	100	110	120	130	85	87
T, K	323	333	343	353	363	373	383	393	403	358	360
$p, \text{кПа}$	34,3	40,6	47,8	56,0	65,3	75,8	87,7	101	116	60,5	62,3

Последние два столбца были рассчитаны для уточнения координат точки пересечения графиков.

Зависимость давления насыщенного пара воды от температуры

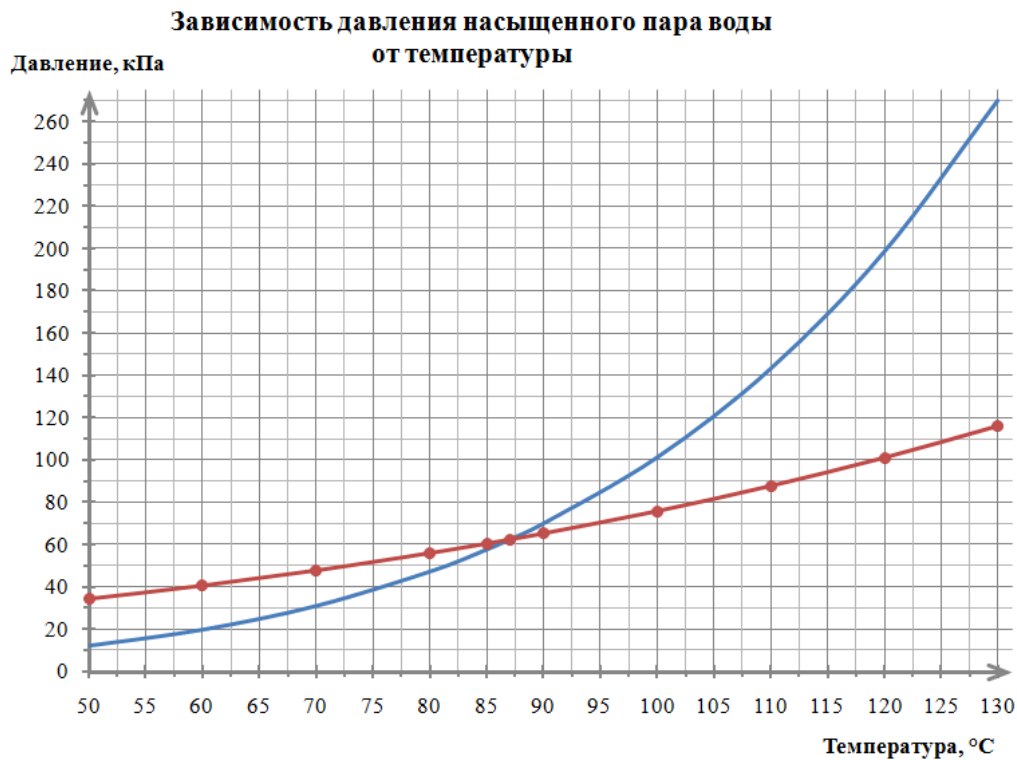


Рисунок 1 - Пересечение графиков зависимости давления от температуры

Из полученного пересечения графиков делаем вывод, что конечное давление после этапа 3-4, при котором пар начнет конденсироваться, приблизительно равно:

$$p_{\text{конд}} = 62,3 \text{ кПа}$$

$$p_{\text{конд}} = 62,3 \text{ кПа}$$

А5. Также из графика мы получаем и температуру, при которой пар начнет и будет дальше изотермически конденсироваться:

$$T_{\text{конд}} = 87 \text{ °C} = 360 \text{ K}$$

$$T_{\text{конд}} = 87 \text{ °C} = 360 \text{ K}$$

Кроме того отметим, что поскольку, согласно условию задачи, конденсация происходит изотермически, то она происходит и изобарно в силу однозначной связи между температурой и давлением насыщенных водяных паров.

А6. В условии отмечено, что насос перекачивает воду адиабатически, то есть без передачи тепла. Кроме того, поскольку плотность воды по условию задачи постоянна, то ее объем в

процессе перекачки не изменяется, что приводит к отсутствию совершаемой работы. По первому началу термодинамики из этого следует, что и внутренняя энергия воды не изменяется в процессе 5-6, то есть ее температура остается постоянной и равной $T_{\text{конд}}$. Теплоту вода получает в процессе нагревания 6-1. Количество этой теплоты можно легко рассчитать с помощью известного выражения:

$$Q_{6-1} = c_{\text{в}} m \Delta T = c_{\text{в}} m (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}})$$

$$Q_{6-1} = c_{\text{в}} m \Delta T = c_{\text{в}} m (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}})$$

Часть В. Исследуем цикл

В1. Схематические диаграммы в координатах p - V и p - T приведены на рисунках.

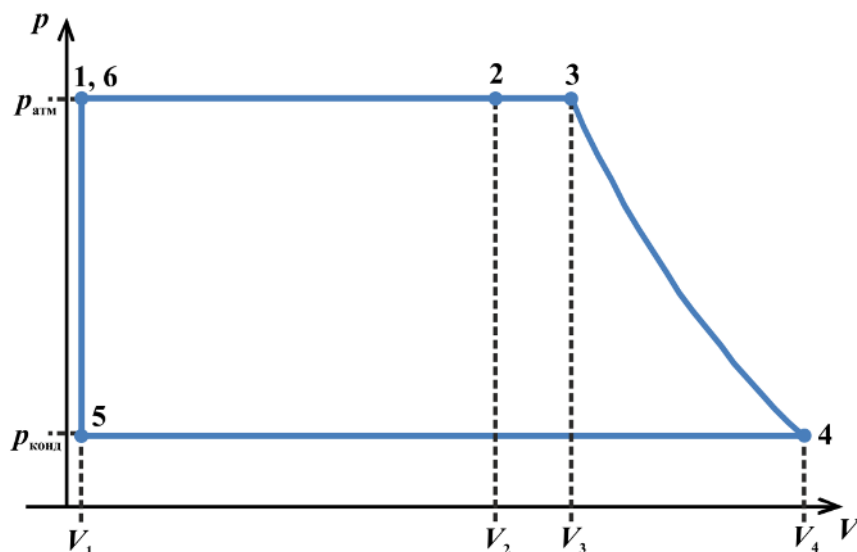


Рисунок 2 - p - V диаграмма цикла

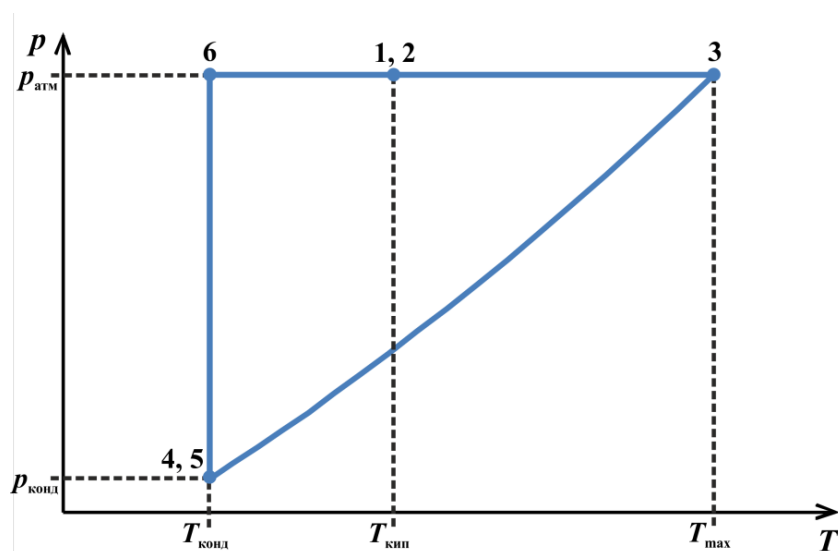


Рисунок 3 - p - T диаграмма цикла

Значения объемов на p - V диаграмме следующие:

$$V_1 = \frac{m}{\rho_{\text{в}}}; \quad V_2 = \frac{mRT_{\text{кип}}}{Mp_{\text{атм}}}; \quad V_3 = \frac{mRT_{\text{max}}}{Mp_{\text{атм}}}; \quad V_4 = \frac{mRT_{\text{конд}}}{Mp_{\text{конд}}}$$

$$V_1 = \frac{m}{\rho_{\text{в}}}; \quad V_2 = \frac{mRT_{\text{кип}}}{Mp_{\text{атм}}}; \quad V_3 = \frac{mRT_{\text{max}}}{Mp_{\text{атм}}}; \quad V_4 = \frac{mRT_{\text{конд}}}{Mp_{\text{конд}}}$$

Необходимо отметить, что объем V_1 значительно меньше остальных характерных объемов, так как плотность воды в жидком состоянии гораздо больше плотности пара.

На p - V диаграмме точки 1 и 6 совпадают, так как при нагревании воды в резервуаре ее давление и объем остаются постоянными. Отметим, что мы здесь пренебрегаем разницей давлений, обусловленной высотой столба жидкости. На p - T диаграмме совпадают точки 1 и 2, а также точки 4 и 5, так как при испарении и конденсации температура и давление остаются постоянными.

Участок 3-4 на обеих диаграммах относится к адиабатическому процессу и отличен от прямой в обоих случаях.

В2. Удельная теплота конденсации связана с теплотой, которую выделяет некоторая порция пара в этом процессе: $Q_{4-5} = L_{T_{\text{конд}}}m$. С другой стороны, эту теплоту можно найти, используя первое начало термодинамики:

$$-Q_{4-5} = A_{4-5} + \Delta U_{4-5}$$

$$-Q_{4-5} = A_{4-5} + \Delta U_{4-5}$$

Знак «минус» здесь учитывает то, что теплота отводится от пара, а не передается ему. Работу газа на участке 4-5 можно легко найти, так как давление при конденсации не изменялось:

$$A_{4-5} = p_{\text{конд}}(V_1 - V_4) = -p_{\text{конд}} \left(\frac{mRT_{\text{конд}}}{Mp_{\text{конд}}} - \frac{m}{\rho_{\text{в}}} \right) = -m \left(\frac{RT_{\text{конд}}}{M} - \frac{p_{\text{конд}}}{\rho_{\text{в}}} \right)$$

$$A_{4-5} = p_{\text{конд}}(V_1 - V_4) = -p_{\text{конд}} \left(\frac{mRT_{\text{конд}}}{Mp_{\text{конд}}} - \frac{m}{\rho_{\text{в}}} \right) = -m \left(\frac{RT_{\text{конд}}}{M} - \frac{p_{\text{конд}}}{\rho_{\text{в}}} \right)$$

Работа отрицательна, так как пар уменьшает свой объем при конденсации. Изменение внутренней энергии найдем из условия того, что она является функцией состояния, и полное изменение внутренней энергии за весь цикл равно нулю:

$$\Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} + \Delta U_{3-4} + \Delta U_{4-5} + \Delta U_{5-6} + \Delta U_{6-1} = 0$$

$$\Delta U_{1-2} + \Delta U_{2-3} + \Delta U_{3-4} + \Delta U_{4-5} + \Delta U_{5-6} + \Delta U_{6-1} = 0$$

В предыдущих частях задачи у нас имеются выражения для всех слагаемых, кроме ΔU_{3-4} и искомого ΔU_{4-5} (напомним, в части **A6** было указано, что $\Delta U_{5-6} = 0$, а ΔU_{6-1} совпадает с Q_{6-1} , так как вода в жидком состоянии работу не совершает). Для адиабатического процесса 3-4 с водяным паром:

$$\Delta U_{3-4} = \frac{9}{2} \nu R \Delta T_{3-4} = \frac{9}{2} \frac{m}{M} R (T_{\text{конд}} - T_{\text{max}})$$

$$\Delta U_{3-4} = \frac{9}{2} \nu R \Delta T_{3-4} = \frac{9}{2} \frac{m}{M} R (T_{\text{конд}} - T_{\text{max}})$$

Тогда искомое изменение внутренней энергии равно:

$$\begin{aligned} \Delta U_{4-5} &= -\Delta U_{1-2} - \Delta U_{2-3} - \Delta U_{3-4} - \Delta U_{6-1} = \\ &= -m \left(L_{100^\circ\text{C}} + \frac{p_{\text{атм}}}{\rho_{\text{в}}} - \frac{RT_{\text{кип}}}{M} \right) - \frac{9}{2} \frac{m}{M} R (T_{\text{max}} - T_{\text{кип}}) - \frac{9}{2} \frac{m}{M} R (T_{\text{конд}} - T_{\text{max}}) - \\ &- c_{\text{в}} m (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) = m \left(-L_{100^\circ\text{C}} - \frac{p_{\text{атм}}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{RT_{\text{кип}}}{M} - (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) \left(c_{\text{в}} - \frac{9}{2} \frac{R}{M} \right) \right) \\ \Delta U_{4-5} &= -\Delta U_{1-2} - \Delta U_{2-3} - \Delta U_{3-4} - \Delta U_{6-1} = \\ &= -m \left(L_{100^\circ\text{C}} + \frac{p_{\text{атм}}}{\rho_{\text{в}}} - \frac{RT_{\text{кип}}}{M} \right) - \frac{9}{2} \frac{m}{M} R (T_{\text{max}} - T_{\text{кип}}) - \frac{9}{2} \frac{m}{M} R (T_{\text{конд}} - T_{\text{max}}) - \\ &- c_{\text{в}} m (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) = m \left(-L_{100^\circ\text{C}} - \frac{p_{\text{атм}}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{RT_{\text{кип}}}{M} - (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) \left(c_{\text{в}} - \frac{9}{2} \frac{R}{M} \right) \right) \end{aligned}$$

Наконец, подставляя полученные результаты для работы и изменения внутренней энергии в первое начало термодинамики, получаем:

$$\begin{aligned} -L_{T_{\text{конд}}} m &= \\ &= -m \left(\frac{RT_{\text{конд}}}{M} - \frac{p_{\text{конд}}}{\rho_{\text{в}}} \right) + m \left(-L_{100^\circ\text{C}} - \frac{p_{\text{атм}}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{RT_{\text{кип}}}{M} - (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) \left(c_{\text{в}} - \frac{9}{2} \frac{R}{M} \right) \right) \\ -L_{T_{\text{конд}}} m &= \\ &= -m \left(\frac{RT_{\text{конд}}}{M} - \frac{p_{\text{конд}}}{\rho_{\text{в}}} \right) + m \left(-L_{100^\circ\text{C}} - \frac{p_{\text{атм}}}{\rho_{\text{в}}} + \frac{RT_{\text{кип}}}{M} - (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) \left(c_{\text{в}} - \frac{9}{2} \frac{R}{M} \right) \right) \end{aligned}$$

Сокращая массу и приводя подобные слагаемые, получаем выражение для искомой удельной теплоты конденсации:

$$L_{T_{\text{конд}}} = L_{100^{\circ}\text{C}} + \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{конд}}}{\rho_{\text{в}}} + (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) \left(c_{\text{в}} - \frac{11}{2} \frac{R}{M} \right) = 2,28 \text{ МДж/кг}$$

$$L_{T_{\text{конд}}} = L_{100^{\circ}\text{C}} + \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{конд}}}{\rho_{\text{в}}} + (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) \left(c_{\text{в}} - \frac{11}{2} \frac{R}{M} \right) = 2,28 \text{ МДж/кг}$$

Разница между значениями удельной теплоты парообразования (конденсации) при разных температурах:

$$\Delta L = L_{T_{\text{конд}}} - L_{100^{\circ}\text{C}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{конд}}}{\rho_{\text{в}}} + (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) \left(c_{\text{в}} - \frac{11}{2} \frac{R}{M} \right) = 21,6 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta L = L_{T_{\text{конд}}} - L_{100^{\circ}\text{C}} = \frac{p_{\text{атм}} - p_{\text{конд}}}{\rho_{\text{в}}} + (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) \left(c_{\text{в}} - \frac{11}{2} \frac{R}{M} \right) = 21,6 \text{ кДж/кг}$$

Интересно отметить, что если в сумме пренебречь первым слагаемым, содержащим давления (а оно на самом деле малое), то разница ΔL оказывается прямо пропорциональна разности температур $T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}$, а коэффициентом пропорциональности оказывается разность удельных теплоемкостей воды и пара при изобарном процессе.

В3. Для определения КПД цикла воспользуемся выражением:

$$\eta = \frac{A}{Q_{\text{пол}}} = \frac{Q_{\text{пол}} - Q_{\text{отд}}}{Q_{\text{пол}}} = 1 - \frac{Q_{\text{отд}}}{Q_{\text{пол}}}$$

$$\eta = \frac{A}{Q_{\text{пол}}} = \frac{Q_{\text{пол}} - Q_{\text{отд}}}{Q_{\text{пол}}} = 1 - \frac{Q_{\text{отд}}}{Q_{\text{пол}}}$$

Теплота поступает в систему на этапе 6-1-2-3. Ее несложно рассчитать, используя уже записанные выше выражения:

$$Q_{\text{пол}} = Q_{6-1} + Q_{1-2} + Q_{2-3} = c_{\text{в}} m (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) + L_{100^{\circ}\text{C}} m + \frac{11}{2} \frac{m}{M} R (T_{\text{max}} - T_{\text{кип}})$$

$$Q_{\text{пол}} = Q_{6-1} + Q_{1-2} + Q_{2-3} = c_{\text{в}} m (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) + L_{100^{\circ}\text{C}} m + \frac{11}{2} \frac{m}{M} R (T_{\text{max}} - T_{\text{кип}})$$

Отдает теплоту система во время конденсации водяного пара. Отдаваемую теплоту несложно определить, используя результаты предыдущего пункта:

$$Q_{\text{отд}} = L_{T_{\text{конд}}} m$$

$$Q_{\text{отд}} = L_{T_{\text{конд}}} m$$

Тогда КПД цикла равен:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{отд}}}{Q_{\text{пол}}} = 1 - \frac{L_{T_{\text{конд}}}}{c_v (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) + L_{100^\circ\text{C}} + \frac{11}{2} \frac{R}{M} (T_{\text{max}} - T_{\text{кип}})} = 3,54 \%$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{отд}}}{Q_{\text{пол}}} = 1 - \frac{L_{T_{\text{конд}}}}{c_v (T_{\text{кип}} - T_{\text{конд}}) + L_{100^\circ\text{C}} + \frac{11}{2} \frac{R}{M} (T_{\text{max}} - T_{\text{кип}})} = 3,54 \%$$

Тепловая машина Карно с такой же максимальной и минимальной температурой работала бы с КПД:

$$\eta_{\text{Карно}} = 1 - \frac{T_{\text{конд}}}{T_{\text{max}}} = 8,40 \%$$

$$\eta_{\text{Карно}} = 1 - \frac{T_{\text{конд}}}{T_{\text{max}}} = 8,40 \%$$

Предложенный тепловой двигатель, как видим, обладает небольшим КПД, однако он всего в 2,4 раза меньше наилучшего возможного КПД при тех же температурах.