

Задача 18.119.56

Определить часовой расход пара D (килограммов в час) и удельный расход пара d (килограммов на киловатт - час) на конденсационную паровую турбину, работающую без регенерации теплоты, по заданной электрической мощности турбогенератора $N_{эл}$, давлению p_1 и температуре t_1 перегретого пара перед турбиной и относительному внутреннему КПД турбины η_{oi} . Давление пара в конденсаторе принять $p_2 = 4 \text{ кПа}$. Механический КПД турбины η_m и КПД электрогенератора η_g принять $\eta_m = \eta_g = 0,99$. Определить также степень сухости пара в конце теоретического и действительного процессов расширения (изобразив процессы в hs диаграмме) и абсолютный электрический КПД турбогенератора. Мощностью привода питательного насоса пренебречь. Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 4.

Таблица 4

Последняя цифра шифра	$N_{эл}, \text{МВт}$	η_{oi}	Предпоследняя цифра шифра	$p_1, \text{МПа}$	$t_1, ^\circ\text{C}$
6	170	0,84	5	13	540

Контрольные вопросы

1. Изобразить схему паросиловой установки и дать её краткое описание.
2. Как влияют начальные и конечные параметры пара на работу и кпд цикла Ренкина, а также на степень сухости пара в конце расширения (x_2)? Указать, каковы минимально допустимые значения x_2 и почему?

Решение

По hs - диаграмме водяного пара на пересечении изобары $p_1 = 13 \text{ МПа}$ и изотермы $t_1 = 540^\circ \text{C}$ находим точку 1, характеризующую состояние перегретого пара перед турбиной. Энтальпия в точке 1 составляет $h_1 = 3445 \text{ кДж/кг}$.

Опускаясь по адиабате $s = \text{const}$ до пересечения с изобарой $p_2 = 4 \text{ кПа} = 0,004 \text{ МПа}$ находим точку, характеризующую состояние пара после теоретического процесса расширения в турбине. Энтальпия в точке 2 составляет $h_2 = 1981 \text{ кДж/кг}$, степень сухости $x_2 = 0,764$.

Относительный внутренний КПД турбины определяется по формуле:

$$\eta_{oi} = \frac{h_1 - h_{2o}}{h_1 - h_2} \quad (1)$$

откуда находим энтальпию пара в конце действительного процесса расширения в турбине

$$h_{2o} = h_1 - (h_1 - h_2) \cdot \eta_{oi}, \text{ кДж/кг} \quad (2)$$

где η_{oi} - относительный внутренней КПД турбины;

$$h_{2o} = 3445 - (3445 - 1981) \cdot 0,84 = 2215 \text{ кДж/кг}$$

На пересечении изобары $p_2 = 0,004 \text{ МПа}$ и изоэнтальпы $h_{2o} = 2215 \text{ кДж/кг}$ находим точку 2_o , характеризующую состояние пара в конце действительного процесса расширения в турбине, степень сухости пара в которой составляет $x_{2o} = 0,861$.

Часовой расход пара:

$$D = \frac{N_{эл}}{(h_1 - h_2) \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_g}, \text{ кг/с} \quad (3)$$

где $N_{эл}$ - электрическая мощность турбогенератора, кВт;

η_m - механический КПД турбины;

η_g - КПД электрогенератора;

$$D = \frac{170 \cdot 10^3}{(3445 - 1981) \cdot 0,84 \cdot 0,99 \cdot 0,99} = 141,1 \text{ кг/с}$$

Удельный расход пара:

$$d = \frac{3600}{(h_1 - h_2) \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_g}, \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)} \quad (4)$$

$$d = \frac{3600}{(3445 - 1981) \cdot 0,84 \cdot 0,99 \cdot 0,99} = 3,0 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}$$

По таблице свойств насыщенного водяного пара (по давлениям) при $p_2 = 4 \text{ кПа}$ находим параметры воды, отводимой от турбины при давлении в конденсаторе: температура $t_3 = 29^\circ \text{C}$, энтальпия $h_3 = 121 \text{ кДж/кг}$.

Количество отведенной теплоты:

$$Q_2 = D \cdot (h_1 - h_3), \text{ кДж/с} \quad (5)$$

$$Q_2 = 141,1 \cdot (3445 - 121) = 469016 \text{ кДж/с}$$

Абсолютный электрический КПД турбогенератора:

$$\eta_t = \frac{N_{эл}}{Q_2} \quad (6)$$

$$\eta_t = \frac{170 \cdot 10^3}{469016} = 0,36$$

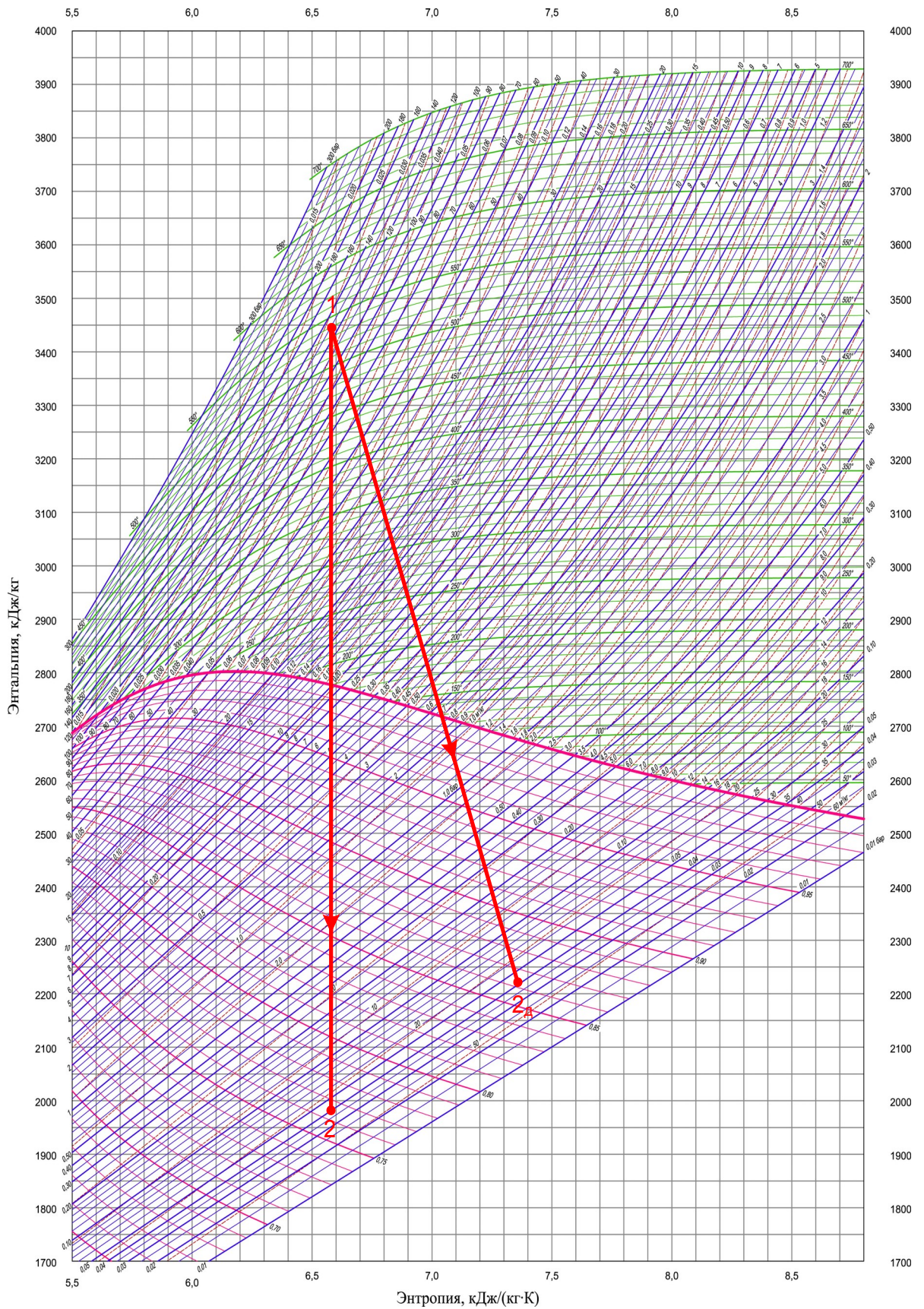


Рисунок 1 - Процесс расширения пара в турбине в $h - s$ - диаграмме

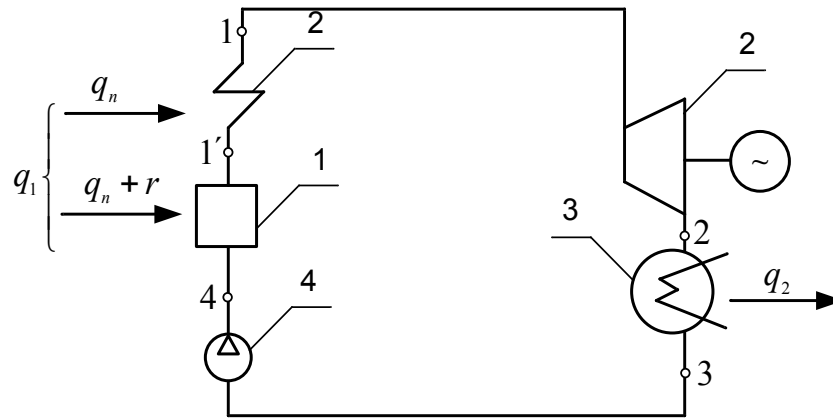


Рисунок 2 - Схема паросиловой установки (цикл Ренкина): 1 - котел; 2 - пароперегреватель; 3 - паровая турбина; 4 - электрогенератор; 5 - конденсатор; 6 - насос.

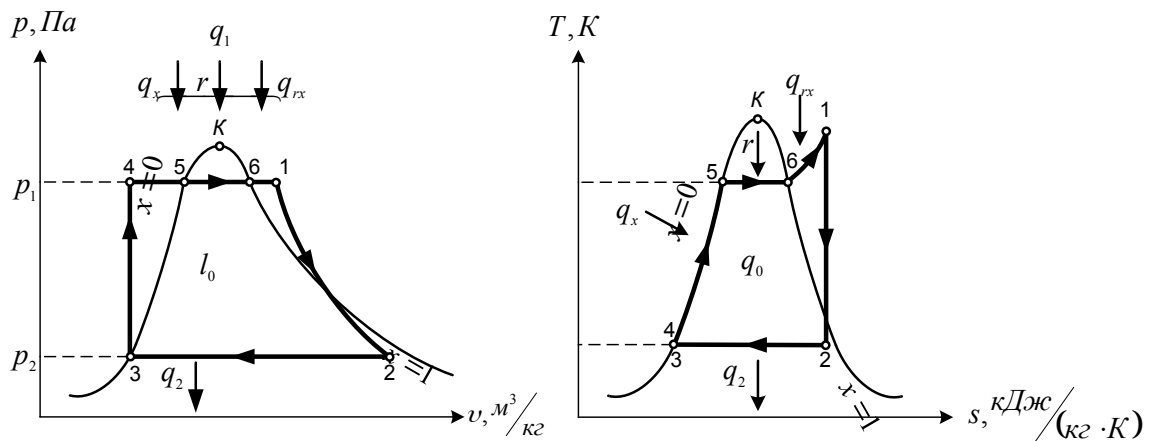


Рисунок 3 - цикл Ренкина в $p - v$ и $T - s$ координатах.

1 В первом котле 1 вода при постоянном давлении нагревается до температуры насыщения (давления) t_n (линия 4-5 на рис. 2), затем в результате подвода теплоты r происходит изобарно - изотермический процесс парообразования (линия 5-6). В пароперегревателе 2 происходит перегрев пара (изобарный процесс 6-1) - повышение температуры пара выше t_n от состояния сухого насыщенного пара (точка 6) до заданной температуры перегрева (точка 1). В паровой турбине 3 пар расширяется адиабатно (линия 1-2) от давления p_1 до давления p_2 в конденсаторе.

В конденсаторе 4 при постоянных давлении и температуре этот пар полностью конденсируется ($x_2 = 0$), отдавая теплоту охлаждающей воде. Конденсат насосом 5 изохорно (ввиду несжимаемости жидкости) перекачивается в паровой котел (линия 3-4). Так как в насосе практически температура конденсата не повышается (точка 4), в $T - s$ -диаграмме точки 3 и 4 оказываются совмещенными. Процесс 4-5 нагрева конденсата до температуры t_n совпадает в $T - s$ -диаграмме с нижней пограничной кривой ($x = 0$). Далее цикл Ренкина повторяется.

2 При повышении начального давления пара p_1 до p_1' и p_1'' ($p_1 < p_1' < p_1''$) при постоянной температуре t_1 и неизменном конечном давлении p_2 , как видно из hs -диаграммы (рис. 4), степень сухости пара уменьшается. Это может привести к разрушению поверхности лопаток турбины. Допустимая степень сухости отработавшего пара должна быть не менее 0,88.

При повышении начальной температуры пара T_1 , поступающего в турбину (рис. 4,б) ($T_1'' > T_1' > T_1$) степень сухости увеличивается.

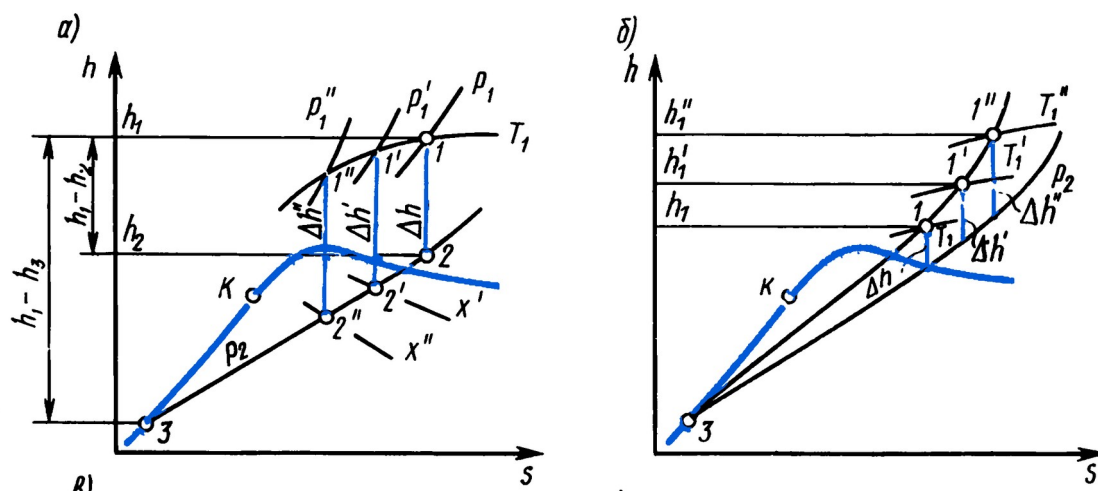


Рисунок 4

Исследование термического к.п.д. цикла Ренкина при различных начальных и конечных состояниях пара позволяет сделать вывод, что с увеличением начального давления и начальной температуры пара к.п.д. паротурбинной установки растет.

При увеличении начального давления пара и одном и том же конечном давлении в конденсаторе термический к.п.д. паротурбинной установки значительно увеличивается, а удельный расход пара уменьшается.

Увеличение начального давления с p_1 до p_1' связано с повышением температуры насыщенного пара, то есть с повышением средней температуры подвода теплоты, что ясно видно из $T - s$ диаграммы (рис. 5,а). Возрастание средней температуры подвода теплоты и отвода теплоты в конденсаторе при $p = const$ приводит к увеличению к.п.д. цикла. Следовательно, не начальное давление является причиной увеличения к.п.д. паросиловой установки, а увеличение средней температуры подвода теплоты. Из $i - s$ - диаграммы (рис. 5,б) также можно установить, что с увеличением начального давления пара увеличивается адиабатное теплопадение h_1 , но повышается конечная влажность пара и капли воды разрушают лопатки последних ступеней турбины. Конечная влажность пара свыше 13 - 14% не допускается.

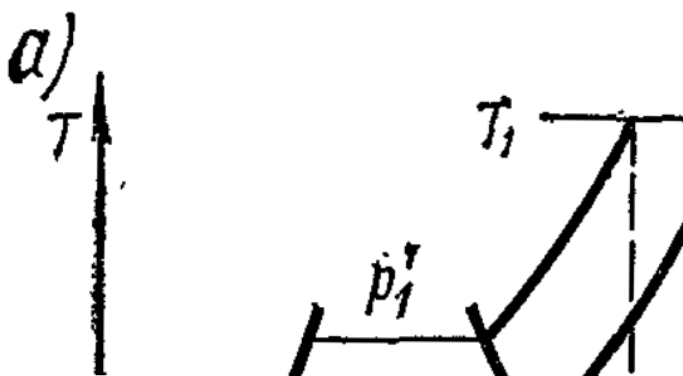


Рисунок 5

Значительное увеличение к.п.д. с ростом начального давления пара имеет существенное значение в повышении экономичности работы паротурбинных установок. При повышении начальной температуры пара происходит увеличение к.п.д. паротурбинного цикла, так как увеличивается среднеинтегральная температура подвода теплоты и при этом растет адиабатное теплопадение h (рис. 6).

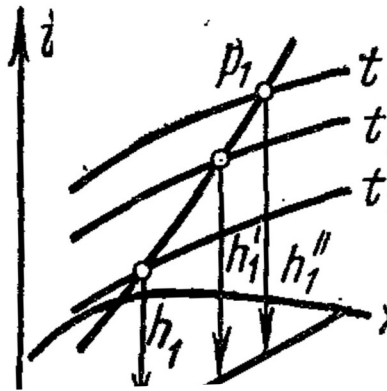


Рисунок 6

Увеличение к.п.д. цикла будет более значительным, если с увеличением температуры будет возрастать и начальное давление пара. Например, при начальном давлении 20бар и повышении температуры с 400 до 550°C к.п.д. цикла увеличивается с $0,332$ до $0,355$. Если же одновременно будет увеличиваться и давление, например до 200бар при тех же условиях, то к.п.д. цикла будет увеличиваться с $0,405$ до $0,434$.

Одновременно с увеличением начальной температуры уменьшается удельный расход пара. В настоящее время используют пар с температурой до 565°C и осваивается пар с температурой до 600°C и выше. Повышение температуры перегрева пара ограничивается способностью металла, из которого сделаны трубы, выдерживать большие давления при высоких температурах, то есть конечные параметры пара определяются наличием относительно дешевых жаропрочных металлов.