

Пример 11.2

Рассчитать энергетические и эксергетические показатели

паротурбинной установки, для которой известны следующие данные:

давление пара на выходе из пароперегревателя котла $p_{\Pi} := 13 \text{ МПа}$,

температура пара на выходе из пароперегревателя котла $T_{\Pi} := 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$, давление

пара на входе в турбину $p_1 := 12,5 \text{ МПа}$, температура пара на входе в турбину $T_1 := 540 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

давление пара в конденсаторе $p_2 := 4 \text{ кПа}$, максимальная температура продуктов сгорания

топлива $T_5 := 2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$; КПД парового котла $\eta_{\text{ПК}} := 0,91$, внутренний относительный КПД

турбины $\eta_{\text{Тоi}} := 0,88$, относительный КПД насоса $\eta_{\text{Hoи}} := 0,85$, механический КПД $\eta_{\text{М}} := 0,99$,

КПД электрического генератора $\eta_{\text{Г}} := 0,98$. Параметры окружающей среды:

температура $T_0 := 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, давление $p_0 := 0,1 \text{ МПа}$. Продукты сгорания обладают

свойствами воздуха.

Решение

Для проведения расчета вначале определим необходимые значения

термодинамических свойств воды и водяного пара в характерных точках цикла

с помощью пакета WaterSteamPro

$$h_{1\Pi} := \text{wspHPT}(p_{\Pi}; T_{\Pi}) = 3471,4 \frac{\text{Дж}}{\text{г}} \quad s_{1\Pi} := \text{wspSPT}(p_{\Pi}; T_{\Pi}) = 6,6087 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

$$h_1 := \text{wspHPT}(p_1; T_1) = 3450,4 \frac{\text{Дж}}{\text{г}} \quad s_1 := \text{wspSPT}(p_1; T_1) = 6,5997 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

$$T_2 := \text{wspTSP}(p_2) = 28,96 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_{2'} := \text{wspHSWT}(T_2) = 121,4 \frac{\text{Дж}}{\text{г}} \quad s_{2'} := \text{wspSSWT}(T_2) = 0,4224 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

$$h_{2''} := \text{wspHSST}(T_2) = 2553,7 \frac{\text{Дж}}{\text{г}} \quad s_{2''} := \text{wspSSST}(T_2) = 8,4735 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

$$x_2 := \text{wspXEXPANSIONPTPEFF}(p_1; T_1; p_2; 1) = 0,7673$$

$$h_2 := \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_1; T_1; p_2; 1) = 1987,6 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$h_{2д} := \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_1; T_1; p_2; \eta_{\text{Тоi}}) = 2163,2 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$x_{2д} := \text{wspXEXPANSIONPTPEFF}(p_1; T_1; p_2; \eta_{\text{Тоi}}) = 0,8394$$

$$s_{2д} := \text{wspSEXPANSIONPTPEFF}(p_1; T_1; p_2; \eta_{\text{Тоi}}) = 7,1808 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

$$h_{3д} := \text{wspHEXPANSIONPTXPEFF}\left(p_2; T_2; 0; p_2; \frac{1}{\eta_{\text{Hoи}}}\right) = 121,4 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$s_3 := s_{2'}$$

$$h_{3д} := h_{2'} + \frac{h_3 - h_{2'}}{\eta_{\text{Hoи}}} = \blacksquare$$

$$p_3 := p_1$$

Ошибка в расчете

Пример 11.2

Рассчитать энергетические

паротурбинной установки, для

давление пара на выходе из

температура пара на выходе из

пара на входе в турбину $p_1 = 12,5$

$t_1 = 540^{\circ}\text{C}$; давление пара в

температура продуктов сгорания

$\eta_{\text{ПК}} = 0,91$, внутренний относительный

относительный КПД насоса $\eta_{\text{Hoи}}^{\text{H}} =$

электрического генератора $\eta_{\text{Г}}$

температура $t_0 = 10^{\circ}\text{C}$, давление

свойствами воздуха.

Схема установки представл

в T, s -диаграмме — на рис. 11.11,

Решение

Для проведения расчета в

термодинамических свойств воды

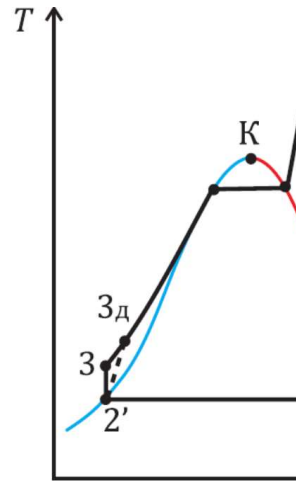
с помощью таблиц [3] или кальку

$$h_{1\Pi} = 3471,4 \text{ кДж/кг}; s_{1\Pi} =$$

$$h_1 = 3450,4 \text{ кДж/кг}; s_1 =$$

$$h_{2'} = 121,4 \text{ кДж/кг}; s_{2'} =$$

$$h_{2''} = 2553,7 \text{ кДж/кг}; s_{2''} =$$



Энтальпию пара в конце изоэнтропного
из условия $s_2 = s_1$ по соотношению (5.14) ст

$$x_2 = \frac{s_2 - s_{2'}}{s_{2''} - s_{2'}} = \frac{6,5997 - 0,4224}{8,4735 - 0,4224} =$$

а затем по аналогичному соотношению (5.13)

$$h_2 = \frac{(1-x) \cdot h_{2'}}{x \cdot h_{2''}} = \frac{(1-0,7673) \cdot 121,4}{0,7673 \cdot 2553,7} = 19$$

(в калькуляторе [6] значение h_2 определяется
 s_2).

Энтальпию пара в конце необрати
рассчитаем, используя формулу (11.14) для с
турбины

$$h_{2д} = h_1 - \eta_{\text{Тоi}}^{\text{T}} \cdot (h_1 - h_2) = 3450,4 - 0,88 \cdot (3455,8 - 1987,7) =$$

что позволяет определить степень сухости
процесса расширения

$$x_{2д} = \frac{h_{2д} - h_{2'}}{h_{2''} - h_{2'}} = \frac{2163,2 - 121,4}{2553,7 - 121,4} =$$

и его энтропию

$$h_3 := \text{wspHPS} \left(p_{II}; s_3 \right) = 134,4 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$h_{3д} := h_2 + \frac{h_3 - h_2}{\eta_{Hoi}} = 136,7 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$s_{3д} := \text{wspSPH} \left(p_{II}; h_{3д} \right) = 0,4300 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

$$\eta_i = \frac{l_{ПТУ}^A}{q_1^A} = \frac{l_T^A - l_H^A}{q_1^A} = \frac{(h_1 - h_{2д}) - (h_{3д} - h_{2'})}{h_1 - h_{3д}}. \quad (11,13)$$

$$\eta_i := \frac{(h_1 - h_{2д}) - (h_{3д} - h_{2'})}{h_1 - h_{3д}} = 0,384$$

$$\eta_{III} := \frac{h_1 - h_{3д}}{h_{1II} - h_{3д}} = 0,994$$

$$h_{ПТУе} := \eta_{ПК} \cdot \eta_{III} \cdot \eta_i \cdot \eta_M \cdot \eta_{\Gamma} = 0,337$$

$$h_0 := \text{wspHPT} \left(p_0; T_0 \right) = 42,12 \frac{\text{Дж}}{\text{г}} \quad s_0 := \text{wspSPT} \left(p_0; T_0 \right) = 0,1511 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

Gas := "Air"

$$h_{o,r} := \text{wspgHGST} \left(Gas; T_0 \right) = 283,5 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$s_{o,r} := \text{wspgSGSPT} \left(Gas; p_0; T_0 \right) = 6,813 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

$$e_{1II} := (h_{1II} - h_0) - T_0 \cdot (s_{1II} - s_0) = 1600,8 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$e_1 := (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) = 1582,4 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$e_2 := (h_2 - h_0) - T_0 \cdot (s_2 - s_0) = \blacksquare \frac{\text{Дж}}{\text{г}} \quad \text{Ошибка в расчете}$$

$$s_2 := s_1 = 6,59974 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

$$e_2 := (h_2 - h_0) - T_0 \cdot (s_2 - s_0) = 119,6 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$e_3 := (h_3 - h_0) - T_0 \cdot (s_3 - s_0) = 15,46 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$e_{3д} := (h_{3д} - h_0) - T_0 \cdot (s_{3д} - s_0) = 15,61 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

g пара := г

$$q_{топл} := \frac{h_{1II} - h_{3д}}{\eta_{ПК}} = 3664,5 \frac{\text{Дж}}{\text{г пара}}$$

$$e_{топл} := q_{топл}$$

$$(1 - 0,8394) \cdot 0,4224 + 0,8394 \cdot 8,4735 =$$

Энтальпию воды в конце необратимого процесса вычислим, применив формулу (11.15) для насоса

$$h_{3д} = h_{2'} + \frac{h_3 - h_{2'}}{\eta_{oi}} = 121,4 + \frac{134,4 - 121,4}{0,85}$$

По этой величине при давлении p_{II} калькулятора [6] найдем значение состояния — $s_{3д} = 0,4300$ кДж/(кг·К).

Зная свойства воды и пара в характерных точках цикла по формуле (11.13) определить его внутренний КПД

$$\eta_i = \frac{(3450,4 - 2163,2) - (136,7 - 121,4)}{3450,4 - 136,7}$$

а рассчитав КПД главного паропровода

$$\eta_{III} = \frac{h_1 - h_{3д}}{h_{1II} - h_{3д}} = \frac{3450,4 - 136,7}{3471,4 - 136,7}$$

по формуле (11.21) найти эффективный КПД

$$\eta_{е}^{ПТУ} = \eta_{ПК} \cdot \eta_{III} \cdot \eta_i \cdot \eta_M \cdot \eta_{\Gamma} = 0,91 \cdot 0,994 \cdot 0,337 = 0,337$$

Перейдем теперь к эксергетическому анализу цикла. Прежде всего, определим свойства наших сред в характерных точках.

Для воды при $p_0 = 0,1$ МПа и $t_0 = 10^\circ\text{C}$

$$h_0 = 42,1 \text{ кДж/кг}; s_0 = 0,1511 \text{ кДж/кг·К}$$

Для газообразных продуктов сгорания свойства совпадают со свойствами воздуха, получим:

$$h_{o,r} = 284,5 \text{ кДж/кг}; s_{o,r} = 6,8307 \text{ кДж/кг·К}$$

Далее определим эксергию воды и водяного пара в характерных точках цикла. Учитывая, что все процессы в установившемся режиме являются обратимыми, расчет эксергии проведем по формуле (7.3)

$$e = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)$$

$$e_{1II} = (3471,4 - 42,1) - 283,15 \cdot (6,601 - 0,1511) = 1600,8 \text{ кДж/кг},$$

$$e_1 = (3450,4 - 42,1) - 283,15 \cdot (6,5997 - 0,1511) = 1582,4 \text{ кДж/кг},$$

$$e_2 = (1987,7 - 42,1) - 283,15 \cdot (6,5997 - 0,1511) = 119,6 \text{ кДж/кг},$$

$$e_{2д} = (2163,2 - 42,1) - 283,15 \cdot (7,1803 - 0,1511) = 130,7 \text{ кДж/кг},$$

$$e_{2'} = (121,4 - 42,1) - 283,15 \cdot (0,4224 - 0,1511) = 15,46 \text{ кДж/кг},$$

$$e_3 = (134,4 - 42,1) - 283,15 \cdot (0,4224 - 0,1511) = 15,61 \text{ кДж/кг},$$

$$e_{3д} = (136,7 - 42,1) - 283,15 \cdot (0,4300 - 0,1511) = 15,61 \text{ кДж/кг},$$

Для осуществления работы паротурбинной установки требуется затрата эксергии топлива, равная эксергии химической энергии сжигаемого топлива. Эксергия топлива зависит от его состава и температуры. Для упрощения будем вести расчет на 1 кг пара. При этом условии затрата эксергии топлива в расчете на 1 кг пара

$$e_{топл} = q_{топл} = \frac{h_{1II} - h_{3д}}{\eta_{ПК}} = \frac{3471,4 - 136,7}{0,91} = 3664,5 \text{ кДж/кг}$$

Рассмотрим теперь как эта эксергия используется в установках.

$$m := \frac{h_{1п} - h_{3д}}{\eta_{ПК} \cdot (h_4 - h_{o,r})} = \blacksquare$$

$$h_4 := \text{wspgHGST} \left(\text{"Air"}; T_5 \right) = 2596,2 \frac{\text{Дж}}{\text{г пара}}$$

$$m := \frac{h_{1п} - h_{3д}}{\eta_{ПК} \cdot (h_4 - h_{o,r})} = 1,585 \frac{\text{г}}{\text{г пара}}$$

$$e_4 := m \cdot \left((h_4 - h_{o,r}) - T_0 \cdot (s_4 - s_{o,r}) \right) = \blacksquare$$

$$s_4 := \text{wspgSGSPT} \left(\text{Gas}; p_0; T_5 \right) = 9,1297 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

$$e_4 := m \cdot \left((h_4 - h_{o,r}) - T_0 \cdot (s_4 - s_{o,r}) \right) = 2624,99 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\Delta e_{cr} := e_{топл} - e_4 = 1039,49 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\Delta e_{теп} := e_4 - (e_{1п} - e_{3д}) = 1039,81 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

где

$$e_4 = 2624,99 \frac{\text{Дж}}{\text{г}} \quad e_{1п} = 1600,79 \frac{\text{Дж}}{\text{г}} \quad e_{3д} = 15,61 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\Delta e_{ПК} := \Delta e_{cr} + \Delta e_{теп} = 2079,3 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\eta_{ПК \text{ ex}} := 1 - \frac{\Delta e_{ПК}}{e_{топл}} = 0,4326$$

$$h_{yx,r} := h_4 - \frac{h_{1п} - h_{3д}}{m} = 491,7 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$T_{yx,r} := \text{wspgTGSH} \left(\text{Gas}; h_{yx,r} \right) = 215,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$s_{o \text{ } yx,r} := \text{wspgSGSPT} \left(\text{Gas}; p_0; T_{yx,r} \right) = 7,365 \frac{\text{Дж}}{\text{г К}}$$

$$e_{yx,r} := m \cdot \left((h_{yx,r} - h_{o,r}) - T_0 \cdot (s_{o \text{ } yx,r} - s_{o,r}) \right) = 82,08 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\Delta e_{пп} := e_{1п} - e_1 = 18,41 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\Delta e_T := T_0 \cdot (s_{2д} - s_2) = 164,5 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\Delta l_T := h_{2д} - h_2 = 175,5 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\eta_{T \text{ ex}} := 1 - \frac{\Delta e_T}{e_1 - e_{2д}} = \blacksquare$$

Паровой котел. Здесь к каждому кг пара за счет теплообмена подводится теплота равная $(h_{1п} - h_{3д})$. Для этого топливо должен быть нагрет от температуры $t_0 = 10^\circ\text{C}$ до 2000°C (рис. 11.12) с затратой теплоты топлива, равной $Q_{\text{топл}}$. Расход воздуха (продуктов сгорания) в расчете на 1 кг пара:

$$m = \frac{(h_{1п} - h_{3д})}{\eta_{ПК} \cdot (h_4 - h_{o,r})} = \frac{(3471,4 - 136,7)}{0,91(2597,2 - 284,5)} = 1,5845 \text{ кг/кг пара.}$$

Эксергия этого количества воздуха равна

$$e_4 = m \cdot [(h_4 - h_{o,r}) - T_0 \cdot (s_4 - s_{o,r})] = 1,5845 [(2597,2 - 284,5) - 283,15(9,1476 - 6,8308)] = 2624,99 \text{ Дж/г}$$

Таким образом, потеря эксергии при сгорании топлива

$$\Delta e_{cr} = e_{топл} - e_4 = 3664,5 - 2625,7 = 1038,8 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta e_{теп} = e_4 - (e_{1п} - e_{3д}) = 2625,7 - (1600,8 - 15,61) = 1041,3 \text{ кДж/кг}$$

Таким образом, общая потеря эксергии в паровом котле

$$\Delta e_{ПК} = \Delta e_{cr} + \Delta e_{теп} = 1038,8 + 1041,3 \text{ кДж/кг}$$

а эксергетический КПД его равен

$$\eta_{ex}^{ПК} = 1 - \frac{\Delta e_{ПК}}{e_{топл}} = 1 - \frac{2080,1}{3664,5} = 0,432.$$

Энтальпию продуктов сгорания на выходе из котла можно определить из теплового баланса

$$(h_{1п} - h_{3д}) = m \cdot (h_4 - h_{yx,r}).$$

Отсюда

$$h_{yx,r} = h_4 - \frac{h_{1п} - h_{3д}}{m} = 2597,2 - \frac{3471,4 - 136,7}{1,5845} = 491,7 \text{ Дж/г}$$

и, обратившись к таблицам [2, 3] или калькулятору, найдем $t_{yx,r} = 214,8^\circ\text{C}$, $s_{yx,r}^0 = 7,3816 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ и рассчитаем эксергию продуктов сгорания

$$e_{yx,r} = m \cdot [(h_{yx,r} - h_{o,r}) - T_0 \cdot (s_{yx,r}^0 - s_{o,r}^0)] = 1,5845[(492,6 - 284,5) - 283,15(7,3816 - 6,8308)] = 82,08 \text{ Дж/г}$$

Главный паропровод. Процесс течения перегретого пара в паропроводе котельной установки до входа в турбину сопровождается потерями эксергии из-за теплообмена с окружающей средой и тепловыми потерями в окружающую среду. Эти потери необратимы и приводят к потере эксергии. Величину потерь эксергии пара на входе и выходе паропровода можно рассчитать по формулам

$$\Delta e_{пп} = e_{1п} - e_1 = 1600,8 - 1582,4 = 18,4 \text{ кДж/кг}$$

а затем рассчитать эксергетический КПД паропровода

$$\eta_{ex}^{ПП} = 1 - \frac{\Delta e_{пп}}{e_{1п}} = 1 - \frac{18,4}{1600,8} = 0,988$$

Турбогенератор. Потерю эксергии при адиабатном течении пара в проточной части турбины можно рассчитать по формулам Гюи-Стодолы (7.7)

$$\Delta e_T = T_0 \cdot (s_{2д} - s_2) = 283,15 \cdot (9,1476 - 8,9831) = 164,5 \text{ кДж/кг.}$$

Отметим, что эта величина меньше потерь эксергии в паропроводе

$$\Delta l_T = h_{2д} - h_2 = 2163,2 - 1987,7 = 175,5 \text{ кДж/кг.}$$

Объясняется это тем, что в конечном состоянии пара температура $t_2 = 28,96^\circ\text{C}$ выше температуры окружающей среды, поэтому пар обладает эксергией и может совершить работу.

$$e_{2д} := (h_{2д} - h_0) - T_0 \cdot (s_{2д} - s_0) = 130,6 \frac{\text{Дж}}{\text{г}}$$

$$\eta_{T \text{ ex}} := 1 - \frac{\Delta e_T}{e_1 - e_{2д}} = 0,8867$$

температура пара в конце расширения больше температуры окружающей среды, то потеря эксергии была показано в §7.2.

По этой же причине эксергетический

$$\eta_{ex}^T = 1 - \frac{\Delta e_T}{e_1 - e_{2д}} = 1 - \frac{164,5}{1582,4 - 130,6}$$

в нашем случае несколько выше относительно 0,88.