

Задача.

Газотурбинная установка работает по теоретическому циклу с изобарным подводом тепла и регенерацией. Рабочее тело обладает свойствами воздуха и имеет начальные параметры $p_1 = 1$ бар и $t_1 = 15$ градусов С. Степень повышения давления в цикле $\beta = 4,0$, температура перед турбиной $t_3 = 800$ градусов С, степень регенерации $r = 0,5$.

Определить подведенную теплоту q_1 кДж/кг, работу l кДж/кг и термический КПД цикла η_t при заданной степени регенерации и без регенерации, а также термический КПД цикла Карно в том же интервале температур.

Построить эти циклы в масштабе, совместив их на одном рисунке.

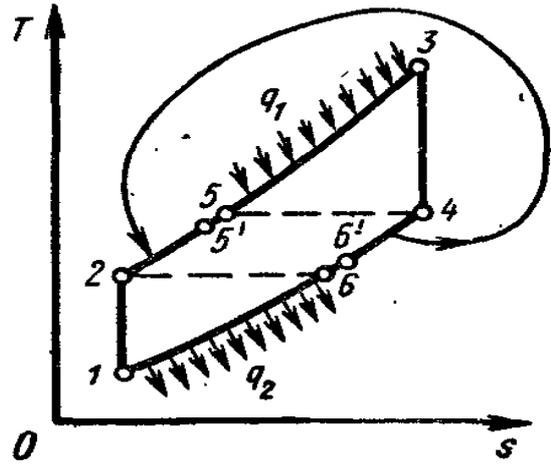
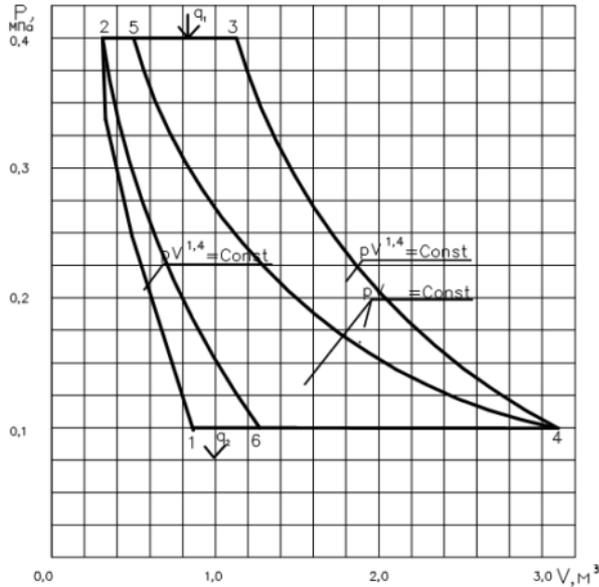


Рис.1 Цикл ГТУ с регенерацией тепла:

1-2 адиабатное сжатие в компрессоре
2-5-3 изобарный подвод тепла в камере сгорания; 3-4 адиабатное расширение в турбине; 4-6-1 изобара с отводом тепла в атмосферу.

Дано:

Цикл ГТУ с регенерацией:
 $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 15$ °С; $k = 1,4$
температура на входе в турбину $t_3 = 800$ °С;
степень повышения давления $\beta = p_2 / p_1 = 4$;
степень регенерации теплоты $r = 0,5$.

Найти:

- Параметры газа в характерных точках цикла; - ?
- Работа цикла, $l_{ц}$ - ?
- Подведенное тепло, $q_{1рег}$ - ?
- Отведенное тепло, $q_{2рег}$ - ?
- Термический к.п.д. цикла с регенераций, $\eta_{трег}$ - ?
- Термический к.п.д. цикла без регенерации, η_t - ?
- Термический к.п.д. цикла Карно для данных температур, η_n - ?
- Отобразить цикл в p-v и T-s диаграммах - ?

Решение.

Степень регенерации теплоты:

$$r = (T_{5'} - T_2) / (T_5 - T_2). \tag{1}$$

Очевидно, что в предельном случае, т.е. при полной регенерации $T_{5'} = T_5$ или $r = 1$.

Процесс 1-2 адиабатическое сжатие.

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа; } T_1 = 288 \text{ К, } p_2 = p_1 \cdot \beta$$

Из уравнения адиабаты можно записать:

$$p_1 \cdot v_1^k = p_2 \cdot v_2^k \quad (2)$$

или

$$v_1 = m \cdot R \cdot T_1 / (\mu \cdot p_1) = 1 \cdot 8314 \cdot 288 / (29 \cdot 101000) = 0,826 \text{ м}^3 \quad (3)$$

$$v_2 = v_1 \cdot (p_1 / p_2)^{1/k} = v_1 \cdot \beta^{-1/k} = 0,826 \cdot 4^{-1/1,4} = 0,307. \quad (4)$$

Т.к. масса газов и молекулярная масса продуктов сгорания неизменны в течение процесса 1-2, то из уравнения Менделеева-Клапейрона можно записать:

$$p_1 \cdot v_1 / T_1 = p_2 \cdot v_2 / T_2, \quad (5)$$

или

$$T_2 = p_2 \cdot v_2 \cdot T_1 / p_1 \cdot v_1 = T_1 \cdot \beta^{1-1/k} \quad (6)$$

Подставим в выражение (6) числовые значения:

$$T_2 = 288 \cdot 4^{1-1/1,4} = 288 \cdot 4^{0,286} = 288 \cdot 1,49 = 428 \text{ К} \quad (7)$$

$$p_2 = 0,1 \cdot 4 = 0,4 \text{ МПа} \quad (8)$$

Процесс 2-3 изобарный подвод теплоты.

$$p_2 = p_3 = 0,4 \text{ МПа}; \quad T_2 = 428 \text{ К}, \quad v_2 = v_1 \cdot \beta^{-1/k}; \quad T_3 = 1073 \text{ К}; \quad c_p = 1,0 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

Т.к. масса газов и молекулярная масса продуктов сгорания неизменны в течение процесса 2-3, то из уравнения Менделеева-Клапейрона можно записать:

$$p_3 \cdot v_3 / T_3 = p_2 \cdot v_2 / T_2, \quad (9)$$

или

$$v_3 = p_2 \cdot v_2 \cdot T_3 / (p_3 \cdot T_2) = T_3 \cdot v_1 / (T_1 \cdot \beta^{1/k}) \quad (10)$$

$$v_3 = p_2 \cdot v_2 \cdot T_3 / (p_3 \cdot T_2) = 1073 \cdot 0,826 / (288 \cdot 4^{1/1,4}) = 1,143 \text{ м}^3. \quad (11)$$

Процесс 3-4 адиабатическое расширение.

$$p_3 = 0,4 \text{ МПа}; \quad T_3 = 1073 \text{ К}; \quad v_3 = T_3 \cdot v_1 / (T_1 \cdot \beta^{1/k}); \quad p_4 = p_1$$

Из уравнения адиабаты можно записать:

$$p_3 \cdot v_3^k = p_4 \cdot v_4^k \quad (12)$$

или, учитывая, что $p_4 = p_1$, а $p_3 = p_2$ и $(p_3 / p_4) = (p_2 / p_1) = \beta$:

$$v_4 = v_3 \cdot (p_3 / p_4)^{1/k} = v_3 \cdot \beta^{1/k} = 1,143 \cdot 4^{1/1,4} = 3,076 \text{ м}^3 \quad (13)$$

Т.к. масса газов и молекулярная масса продуктов сгорания неизменны в течение процесса 3-4, то из уравнения Менделеева-Клапейрона можно записать:

$$p_3 \cdot v_3 / T_3 = p_4 \cdot v_4 / T_4, \quad (14)$$

или

$$T_4 = p_4 \cdot v_1 \cdot (T_3 / T_1) \cdot T_3 / [p_1 \cdot \beta \cdot T_3 \cdot v_1 / (T_1 \cdot \beta^{1/k})] \quad (15)$$

Подставим в выражение (14):

$$p_4 = p_1 = 0,1 \text{ МПа} \quad (16)$$

$$T_4 = 1073 / 4^{1-1/1,4} = 1073 / 1,49 = 722 \text{ К} \quad (17)$$

Процесс 4-1 изохорный отвод теплоты.

$$p_4 = 0,1 \text{ МПа}; \quad T_4 = 722 \text{ К}, \quad p_1 = 0,1 \text{ МПа}; \quad T_1 = 288 \text{ К}, \quad c_p = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Количество подводимого тепла (считаем, что $T_5 = T_4$), кДж/кг:

$$q_{1\text{рег}} = c_p \cdot [T_3 - T_2 - r \cdot (T_5 - T_2)] = c_p \cdot [T_3 - T_2 - r \cdot (T_4 - T_2)] \quad (18)$$

Подставим в выражение (17) числовые значения:

$$q_{1\text{рег}} = 1,0 \cdot [1073 - 428 - 0,5 \cdot (722 - 428)] = 1,0 \cdot (1073 - 428 - 147) = 1,0 \cdot 498 = 498 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (19)$$

$$q_1 = 1,0 \cdot [1073 - 428 - 0 \cdot (722 - 428)] = 1,0 \cdot (1073 - 428) = 1,0 \cdot 645 = 645 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (20)$$

Отведенное тепло, кДж/кг:

$$q_{2\text{рег}} = c_p \cdot [T_4 - T_1 - r \cdot (T_5 - T_2)] = c_p \cdot [T_4 - T_1 - r \cdot (T_4 - T_2)] \quad (21)$$

Подставим в выражение (19) числовые значения:

$$q_{2\text{рег}} = 1,0 \cdot [722 - 288 - 0,5 \cdot (722 - 428)] = 1,0 \cdot (722 - 288 - 147) = 1,0 \cdot 147 = 147 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (22)$$

$$q_2 = 1,0 \cdot [722 - 288 - 0 \cdot (722 - 428)] = 1,0 \cdot (722 - 288) = 1,0 \cdot 434 = 434 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (23)$$

$$\text{Работа цикла, кДж}/\text{кг}: \quad l_{\text{ц}} = q_1 - q_2 \quad (24)$$

Подставим в выражение (24) числовые значения:

$$l_{\text{ц,рег}} = 498 - 287 = 211 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (24)$$

$$l_{\text{ц}} = 645 - 434 = 211 \text{ кДж}/\text{кг} \quad (25)$$

Работа цикла не меняется в зависимости от регенерации!

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = (q_1 - q_2) / q_1 = 1 - [T_4 - T_1 - r \cdot (T_5 - T_2)] / [T_3 - T_2 - r \cdot (T_5 - T_2)] = l_{\text{ц}} / q_1 \quad (26)$$

Подставим в выражение (23) числовые значения:

КПД цикла ГТУ с регенерацией:

$$\eta_{\text{рег}} = 211 / 498 = 0,424 \quad (27)$$

КПД цикла ГТУ без регенерации:

$$\eta_t = 211 / 645 = 0,327 \quad (28)$$

Термический к. п. д. цикла ГТУ зависит лишь от степени повышения давления β и не зависит от интервала температур, в котором осуществляется цикл. КПД цикла Карно:

$$\eta_k = 1 - T_1/T_3 = 1 - 288/1073 = 0,732 \quad (29)$$

Ответ:

При регенерации:

Работа цикла, $l_{ц} = 211$ кДж/кг

Подведенное тепло, $q_{1рег} = 498$ кДж/кг

Отведенное тепло, $q_{2рег} = 287$ кДж/кг

Термический к.п.д. цикла, $\eta_{тррег} = 0,424$

Без регенерации:

Работа цикла, $l_{ц} = 211$ кДж/кг

Подведенное тепло, $q_1 = 645$ кДж/кг

Отведенное тепло, $q_2 = 434$ кДж/кг

Термический к.п.д. цикла, $\eta_t = 0,327$

КПД цикла Карно в интервале температур $T_3 - T_1$: $\eta_k = 0,732$

Литература.

1. М.П. Вукалович, И.И. Новиков., Термодинамика. –М., «Машиностроение», 1972, - 672с.
2. В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е.Шейндлин Техническая термодинамика. 4-е изд. перераб. – М.: «Энергоатомиздат», 1983, -344с.
3. Ляшков В.И. Теоретические основы теплотехники. Учебное пособие. – М.: Издательство “Машиностроение – 1», 2002 – 258с.