

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
(РУТ (МИИТ))**

Кафедра: «Теплоэнергетика и водоснабжение на транспорте»

КУРСОВАЯ РАБОТА

По дисциплине: «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА»

Тема: «Термодинамические циклы»

Рецензент

К.т.н., доцент Драбкина Е.В.

(подпись)

(дата)

Студент

Соколов А.И.

Шифр: 1910-ц/ЭНб-2409

(подпись)

(дата)

Москва 2022

Задача №1.

Для заданного кругового процесса (цикла), совершаемого рабочим телом в соответствии с табл. П1 и П3, определить:

Параметры состояния (P, V, T) в переходных точках;

Изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в процессах;

Величину работы и теплоты для всех процессов (l, l_{max}, q);

Термический и относительный термический КПД;

Построить цикл в PV и TS координатах.

Исходные данные (последняя цифра шифра 9, вариант 1 в табл. П3):

$$v_1 = 1,1 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad t_1 = 30^\circ\text{C} \quad (T_1 = t_1 + 273 = 30 + 273 = 303 \text{ К}); \quad \frac{v_1}{v_2} = 12; \quad q_{2-3} = 700$$

кДж/кг.

Процессы: 1-2 ($dq=0, P_2 > P_1$), 2-3 ($P=\text{const}$), 3-4 ($T=\text{const}$), 4-1 ($v=\text{const}$);

Объемный состав газа: $r_{\text{CO}_2} = 0,13, r_{\text{O}_2} = 0,14, r_{\text{N}_2} = 0,73$.

Решение.

Средняя молекулярная масса смеси газов равна сумме произведений объемных долей на молекулярные массы отдельных газов, составляющих смесь:

$$\mu = r_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2} + r_{\text{O}_2} \cdot \mu_{\text{O}_2} + r_{\text{N}_2} \cdot \mu_{\text{N}_2},$$

$$\mu_{\text{CO}_2} = 44 \text{ кг/кмоль}, \quad \mu_{\text{O}_2} = 32 \text{ кг/кмоль}, \quad \mu_{\text{N}_2} = 28 \text{ кг/кмоль}.$$

Получим:

$$\mu = 0,13 \cdot 44 + 0,14 \cdot 32 + 0,73 \cdot 28 = 30,64 \text{ кг/кмоль} = 0,03064 \text{ кг/моль}.$$

Газовую постоянную смеси газов определим по формуле:

$$R = \frac{8,314}{\mu},$$

$R_0 = 8,314$ (Дж/моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Получим:

$$R = \frac{8,314}{0,03064} = 271,3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К.}$$

Далее определим изохорную и изобарную теплоемкость смеси. Для этого определим объемные теплоемкости каждого из компонентов смеси, используя формулу Майера. Имеем:

$$c_v = \frac{R}{k - 1};$$

$$c_p = \frac{k \cdot R}{k - 1},$$

где k - число степеней свободы молекулы каждого газа.

$$R_{CO_2} = 189 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}, R_{O_2} = 259,8 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}, R_{N_2} = 296,9 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К.}$$

Для CO_2 ($k = 1,3$):

$$c_v = \frac{189}{1,3 - 1} = 630 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

$$c_p = \frac{1,3 \cdot 189}{1,3 - 1} = 819 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К.}$$

Для O_2 ($k = 1,4$):

$$c_v = \frac{259,8}{1,4 - 1} = 649,5 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

$$c_p = \frac{1,4 \cdot 259,8}{1,4 - 1} = 909,3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К.}$$

Для N_2 ($k = 1,4$):

$$c_v = \frac{296,9}{1,4 - 1} = 742,3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

$$c_p = \frac{1,4 \cdot 296,9}{1,4 - 1} = 1039,3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К.}$$

Получим для смеси:

$$c_v = r_{CO_2} \cdot c_{v_{CO_2}} + r_{O_2} \cdot c_{v_{O_2}} + r_{N_2} \cdot c_{v_{N_2}};$$

$$c_p = r_{CO_2} \cdot c_{p_{CO_2}} + r_{O_2} \cdot c_{p_{O_2}} + r_{N_2} \cdot c_{p_{N_2}};$$

$$c_v = 0,13 \cdot 630 + 0,14 \cdot 649,5 + 0,73 \cdot 742,3 = 714,7 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

$$c_p = c_v + R = 714,7 + 271,3 = 986 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К.}$$

Показатель адиабаты смеси:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{986}{714,7} = 1,38.$$

Далее определим параметры в основных точках цикла.

1-2: процесс адиабатный, $T_1 = 303 \text{ К}$, $v_1 = 1,1 \text{ м}^3/\text{кг}$, $\frac{v_1}{v_2} = 12$.

Точка 1:

По уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$P_1 \cdot v_1 = R \cdot T_1;$$

$$P_1 = \frac{R \cdot T_1}{v_1};$$

$$P_1 = \frac{271,3 \cdot 303}{1,1} = 74743 \text{ Па} = 0,747 \text{ бар}.$$

Точка 2:

$$\frac{v_1}{v_2} = 12;$$

$$v_2 = \frac{v_1}{12} = \frac{1,1}{12} = 0,0917 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Из уравнения адиабаты следует, что:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1};$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1};$$

$$T_2 = 303 \cdot (12)^{1,38-1} = 778,3 \text{ К}.$$

По уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$P_2 \cdot v_2 = R \cdot T_2;$$

$$P_2 = \frac{R \cdot T_2}{v_2};$$

$$P_2 = \frac{271,3 \cdot 778,3}{0,0917} = 2303943 \text{ Па} = 23,039 \text{ бар}.$$

Для обратимого адиабатного процесса $dq = 0$, поэтому он также является изоэнтропным, поэтому:

$$q_{1-2} = 0 \text{ и } ds = 0;$$

$$S_1 = 0 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°С}.$$

В адиабатном процессе работа определяется следующим образом:

$$l_{1-2} = \left(\frac{1}{k-1} \right) \cdot (P_1 \cdot v_1 - P_2 \cdot v_2);$$

$$l_{1-2} = \left(\frac{1}{1,38-1} \right) \cdot (0,747 \cdot 10^5 \cdot 1,1 - 23,039 \cdot 10^5 \cdot 0,0917) = -339720 \text{ Дж/кг} =$$

$$-339,7 \text{ кДж/кг}.$$

По второму закону термодинамики:

$$q_{1-2} = l_{1-2} + du_{1-2};$$

$$du_{1-2} = -l_{1-2};$$

$$du_{1-2} = 339,7 \text{ кДж/кг};$$

$$dh_{1-2} = c_p \cdot (T_2 - T_1);$$

$$dh_{1-2} = 986 \cdot (778,3 - 303) = 468698 \text{ Дж/кг} = 468,7 \text{ кДж/кг}.$$

Техническая работа:

$$l_{\text{тех}} = -du_{1-2} = -339,7 \text{ кДж/кг}.$$

2-3: процесс изобарный, $P_2 = P_3 = 23,039 \text{ бар}$, $v_2 = 0,0917 \text{ м}^3/\text{кг}$, $T_2 = 778,3 \text{ К}$,
 $q_{2-3} = 700 \text{ кДж/кг}$.

Количество теплоты, сообщенное телу в изобарном процессе при постоянной теплоемкости, равно:

$$q_{2-3} = h_3 - h_2 = c_p \cdot (T_3 - T_2).$$

Отсюда выразим температуру T_3 :

$$T_3 = \frac{q_{2-3}}{c_p} + T_2;$$

$$T_3 = \frac{700000}{986} + 778,3 = 1488,2 \text{ К}.$$

По уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$P_3 \cdot v_3 = R \cdot T_3;$$

$$v_3 = \frac{R \cdot T_3}{P_3};$$

$$v_3 = \frac{271,3 \cdot 1488,2}{23,039 \cdot 10^5} = 0,1753 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Работа определяется следующим образом:

$$l_{2-3} = P_2 \cdot (v_3 - v_2);$$

$$l_{2-3} = 23,039 \cdot 10^5 \cdot (0,1753 - 0,0917) = 192628 \text{ Дж/кг} = 192,6 \text{ кДж/кг}.$$

Для изобарного процесса при постоянной теплоемкости изменение энтропии находится следующим образом:

$$S_3 - S_2 = c_p \cdot \ln \frac{v_3}{v_2};$$

$$S_3 - S_2 = 986 \cdot \ln \frac{0,1753}{0,0917} = 639 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К};$$

$$S_3 = S_2 + (S_3 - S_2) = 0 + 639 = 639 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}.$$

По второму закону термодинамики:

$$q_{2-3} = l_{2-3} + du;$$

$$du_{2-3} = q_{2-3} - l_{2-3};$$

$$du_{2-3} = 700 - 192,6 = 507,4 \text{ кДж/кг}.$$

Техническая работа:

$$l_{\text{тех}} = 0 \text{ кДж/кг}.$$

3-4: процесс изотермический, $T_3 = T_4 = 1488,2 \text{ К}$, $P_3 = 23,039 \text{ бар}$, $v_4 = v_1 = 1,1 \text{ м}^3/\text{кг}$, $v_3 = 0,1753 \text{ м}^3/\text{кг}$.

По уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$P_4 \cdot v_4 = R \cdot T_4;$$

$$P_4 = \frac{R \cdot T_4}{v_4};$$

$$P_4 = \frac{271,3 \cdot 1488,2}{1,1} = 367111 \text{ Па} = 3,671 \text{ бар}.$$

Энтальпия и внутренняя энергия смеси газов в изотермическом процессе не меняются, то есть:

$$du = 0 \text{ и } dh = 0.$$

В изотермическом процессе количество подведенной к рабочему телу теплоты численно равно работе изменения объема:

$$q_{3-4} = l_{3-4} = R \cdot T_3 \cdot \ln \frac{P_3}{P_4};$$

$$q_{3-4} = l_{3-4} = 271,3 \cdot 1488,2 \cdot \ln \frac{23,039}{3,671} = 741706 \text{ Дж/кг} = 741,7 \text{ кДж/кг}.$$

Изменение энтропии определяется следующим образом:

$$S_4 - S_3 = R \cdot \ln \frac{P_3}{P_4};$$

$$S_4 - S_3 = 271,3 \cdot \ln \frac{23,039}{3,671} = 498 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

$$S_4 = 639 + 498 = 1137 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}.$$

Техническая работа:

$$l_{mex} = l_{3-4} = 741,7 \text{ кДж/кг}.$$

4-1: процесс изохорный.

Работа газа в изохорном процессе равна 0:

$$l_{4-1} = 0 \text{ кДж/кг}.$$

Количество теплоты, сообщенное телу в изохорном процессе при постоянной теплоемкости, равно:

$$q_{4-1} = \Delta u_{4-1} = c_v \cdot (T_1 - T_4);$$

$$q_{4-1} = \Delta u_{4-1} = 714,7 \cdot (303 - 1488,2) = -847093 \text{ Дж/кг} = -847,1 \text{ кДж/кг}.$$

Для изохорного процесса при постоянной теплоемкости изменение энтропии находится следующим образом:

$$\Delta S_{4-1} = c_v \cdot \ln \frac{P_1}{P_4};$$

$$\Delta S_{4-1} = 714,7 \cdot \ln \frac{0,747 \cdot 10^5}{3,671 \cdot 10^5} = -1137 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К};$$

$$S_1 = S_4 + \Delta S_{4-1} = 1137 - 1137 = 0 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}.$$

Определим изменение энтальпии:

$$\Delta h_{4-1} = c_p \cdot (T_1 - T_4);$$

$$\Delta h_{4-1} = 0,986 \cdot (303 - 1488,2) = -1168698 \text{ Дж/кг} = -1168,7 \text{ кДж/кг}.$$

Техническая работа:

$$l_{mex} = v_4 \cdot (P_1 - P_4) = 1,1 \cdot (0,747 \cdot 10^5 - 3,671 \cdot 10^5) = -321605 \text{ Дж/кг} = -321,6 \text{ кДж/кг}.$$

Выполним проверку.

Алгебраическая сумма изменений внутренней энергии, энтальпии и энтропии для всего цикла должна быть равна нулю:

$$du_{1-2} + du_{2-3} + du_{3-4} + du_{4-1} = 339,7 + 507,4 + 0 - 847,1 = 0 \text{ - верно;}$$

$$dh_{1-2} + dh_{2-3} + dh_{3-4} + dh_{4-1} = 468,7 + 700 + 0 - 1168,7 = 0 \text{ - верно;}$$

$$ds_{1-2} + ds_{2-3} + ds_{3-4} + ds_{4-1} = 0 + 639 + 498 - 1137 = 0 \text{ - верно.}$$

Полезная работа в цикле, определенная как алгебраическая сумма работ отдельных процессов должна быть равна работе, подсчитанной как разность подведенной и отведенной теплоты:

$$\begin{aligned} l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-1} &= q_{1-2} + q_{2-3} + q_{3-4} + q_{4-1}; \\ -339,7 + 192,6 + 741,7 + 0 &= 0 + 700 + 741,7 - 847,1; \\ 594,6 &= 594,6 \text{ - верно.} \end{aligned}$$

Техническая работа цикла:

$$l_{\text{тех}} = -339,7 + 741,7 - 321,6 = 80,4 \text{ кДж/кг.}$$

Определим термический КПД данного цикла:

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{q_1 - q_2}{q_1}; \\ \eta_t &= \frac{(700 + 741,7) - 847,1}{(700 + 741,7)} = 0,412. \end{aligned}$$

Определим термический КПД эквивалентного цикла Карно по граничным температурам:

$$\begin{aligned} \eta_t' &= 1 - \frac{T_2}{T_1}; \\ \eta_t' &= 1 - \frac{423}{773} = 0,796. \end{aligned}$$

Определим относительный термический КПД:

$$\begin{aligned} \eta_o &= \frac{\eta_t}{\eta_t'}; \\ \eta_o &= \frac{0,412}{0,796} = 0,518. \end{aligned}$$

Построим заданные циклы. При построении адиабатного процесса необходимо определить две промежуточные точки. Величины давлений и удельных объемов промежуточных точек определяются по соответствующим параметрам двух известных точек из соотношений:

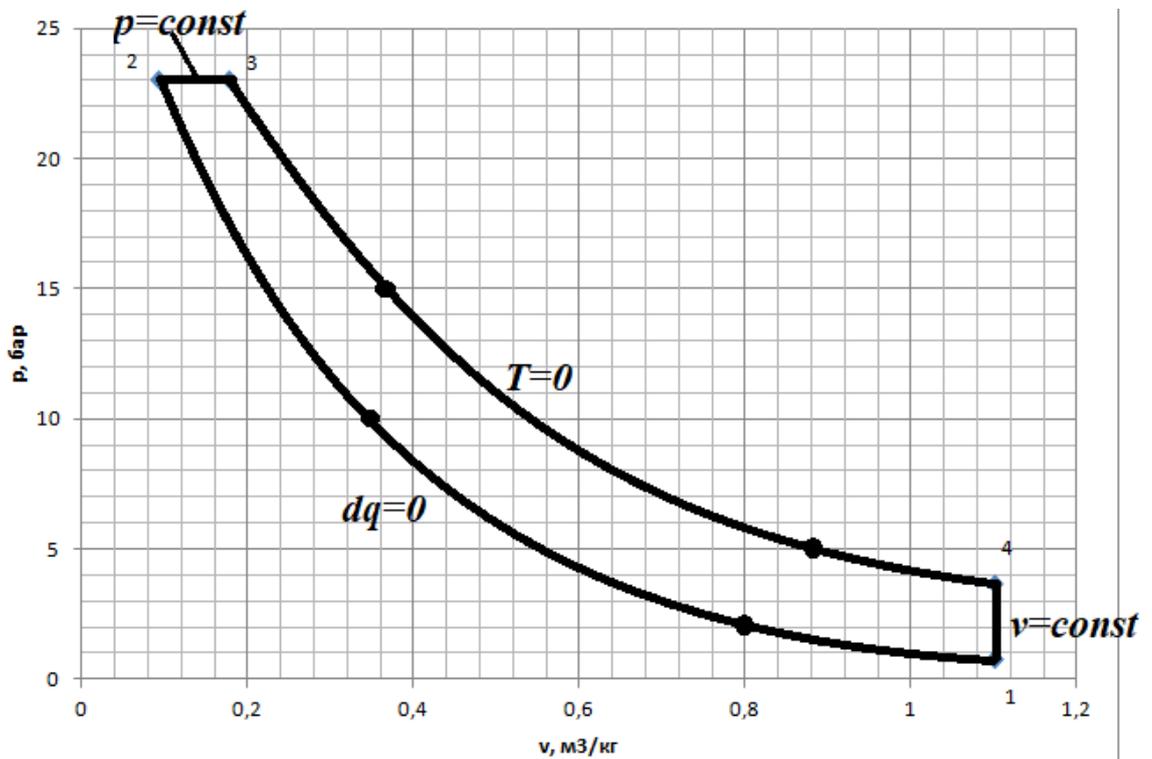
$$P_1' = \sqrt[k]{P_1 \cdot P_2};$$

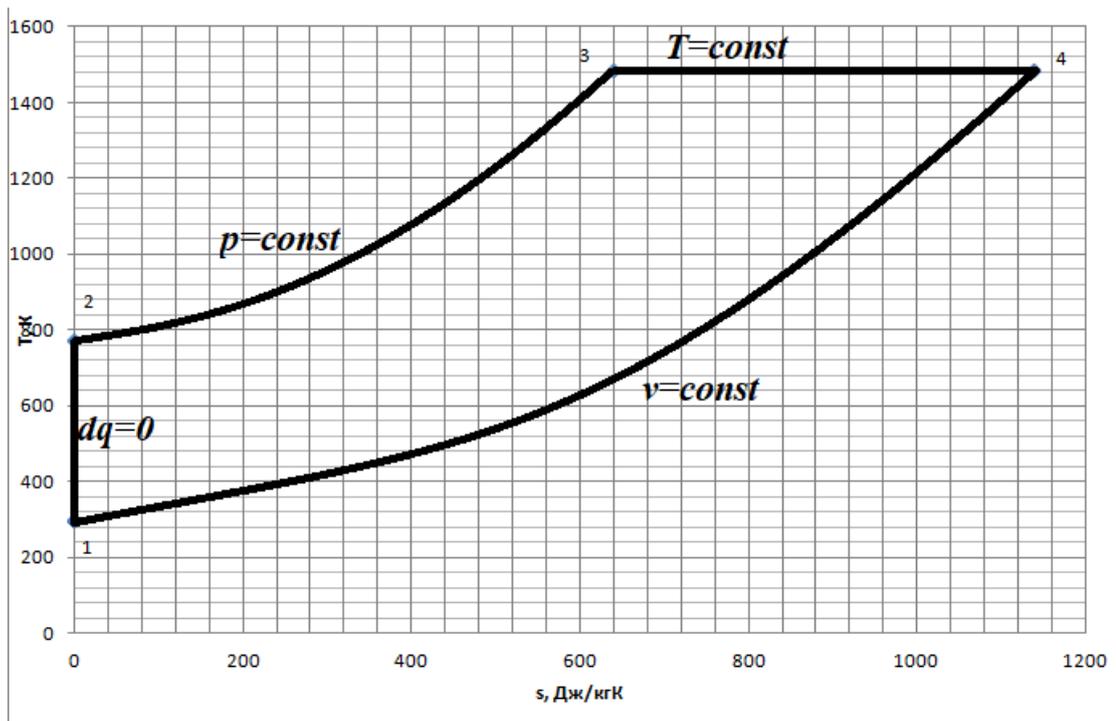
$$v_1' = \sqrt[k]{v_1 \cdot v_2}.$$

Составим таблицы значений:

| Номер параметра | 1 | 1' | 1 | 2 | 3 | 3' | 3 | 4 |
|--------------------------|-------|-----|----------|--------|--------|------|----------|-------|
| P , бар | 0,747 | 2 | 10 | 23,039 | 23,039 | 15 | 5 | 3,671 |
| v , м ³ /кг | 1,1 | 0,8 | 0,35 | 0,0917 | 0,1753 | 0,36 | 0,88 | 1,1 |

| Номер параметра | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------|-----|-------|--------|--------|
| T , К | 303 | 778,3 | 1488,2 | 1488,2 |
| S , Дж/кг·°К | 0 | 0 | 639 | 1137 |





Задача № 2.

1. Для цикла ПСУ по заданным параметрам определить:
 - термический КПД;
 - полезную работу на 1 кг пара;
 - удельный расход пара на 1 кВт·ч получаемой работы.
2. Определить влияние на характеристики цикла двухступенчатой регенерации со смесительными регенераторами. Принять, что подогрев конденсата в системе регенерации должен быть на 40 °С меньше температуры кипения в парогенераторе при заданном давлении P_1 . Температуру конденсата, поступающего из конденсатора в систему регенерации, принять по давлению P_2 .

Повышение температуры в регенераторах принять одинаковым:

$$\Delta t_{\text{регI}} = \Delta t_{\text{регII}} = \frac{\Delta t_{\text{рег}}}{2}$$

$$\Delta t_{\text{рег}} = [(t_{1н} - 40) - t_{н2}]$$

КПД регенераторов принять равным 1.

Подогрев конденсата в регенераторах происходит до температуры конденсации отбираемого из турбины в регенератор пара.

В результате расчетов определить:

1. Температуру конденсата на выходе из регенераторов;
2. Давление отбираемого из турбины пара в регенераторы;
3. Доли отбираемого пара в регенераторы на 1 кг пара, поступающего в турбину;
4. Полезную работу цикла на 1 кг пара, поступающего в турбину из котла;
5. Термический КПД цикла при регенерации и η_t ;
6. Долю пара, проходящего через последнюю ступень турбины – поступающего в конденсатор;
7. Удельный расход пара на 1 кВт·ч работы;
8. В h_s -координатах выполнить график-схему располагаемого теплоперепада с обозначением изобар отбираемого на регенерацию пара и энтальпий.

Исходные данные:

$$P_1 = 40 \text{ бар}, t_1 = 380^\circ\text{C}, P_2 = 0,05 \text{ бар}$$

Решение.

Определим термический КПД цикла ПСУ по заданным значениям

$$P_1 = 40 \text{ бар} = 4000 \text{ кН/м}^2, t_1 = 380^\circ\text{C}, P_2 = 0,05 \text{ бар} = 5 \text{ кН/м}^2:$$

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_k},$$

где h_1 - энтальпия перегретого пара при заданных параметрах P_1 и t_1 ,

$$h_1 = 3166,8 \text{ кДж/кг};$$

h_2 - энтальпия конденсата на входе в конденсатор при P_2 и $S_1 = S_2 = 6,7$ кДж/кг·К, $h_2 = 2042,2$ кДж/кг;

h_k - энтальпия конденсата на выходе из конденсатора. С достаточной точностью она может быть вычислена следующим образом:

$$h_k = 4,19 \cdot t_2.$$

t_2 определяем по h_s -диаграмме: $t_2 = 32,87^\circ\text{C}$.

$$h_k = 4,19 \cdot 32,87 = 137,7 \text{ кДж/кг};$$

$$\eta_t = \frac{3166,8 - 2042,2}{3166,8 - 137,7} = 0,371.$$

Определим общее повышение температуры в регенераторах:

$$\Delta t_{pec} = [(t_{u1} - 40) - t_{u2}],$$

где t_{u1} - температура насыщения при P_1 , $t_{u1} = 250,35^\circ\text{C}$;

t_{u2} - температура насыщения при P_2 , $t_{u2} = t_k = 32,87^\circ\text{C}$.

$$\Delta t_{pec} = [(250,35 - 40) - 32,87] = 177,48^\circ\text{C}.$$

Поскольку по условию задачи принято повышение температуры в каждом из регенераторов одинаковым, то:

$$\Delta t_{pecI} = \Delta t_{pecII} = \frac{\Delta t_{pec}}{2};$$

$$\Delta t_{pecI} = \Delta t_{pecII} = \frac{177,48}{2} = 88,74^\circ\text{C}.$$

Далее определим температуры на выходе из регенераторов:

$$t_{pecII} = 32,87 + 88,74 = 121,61^\circ\text{C};$$

$$t_{pecI} = 121,61 + 88,74 = 210,35^\circ\text{C};$$

Определим давления пара, поступающего на регенераторы из турбины:

$$P_{pecII} = 2,09 \text{ бар} = 209 \text{ кН/м}^2;$$

$$P_{pecI} = 19,21 \text{ бар} = 1921 \text{ кН/м}^2.$$

По полученным значениям давления отбираемого пара с помощью h_s -диаграммы определяются энтальпии пара h_I и h_{II} , поступающего в регенераторы:

$$h_{II} = 2708,3 \text{ кДж/кг};$$

$$h_1 = 2797,4 \text{ кДж/кг.}$$

По полученным значениям давления отбираемого пара с помощью таблиц водяного пара определяются энтальпии конденсата h'_1 и h'_{II} , поступающего в регенераторы:

$$h'_1 = 899,2 \text{ кДж/кг;}$$

$$h'_{II} = 510,7 \text{ кДж/кг.}$$

Запишем тепловой баланс идеально теплоизолированных регенеративных подогревателей, т. е. равенство количеств теплоты, отнимаемой от греющего теплоносителя (пара из отбора), и подводимой к нагреваемому теплоносителю (конденсату из конденсатора) в расчете на 1 кг пара:

$$D_I \cdot (h_1 - h'_1) = (D - D_I) \cdot (h'_1 - h'_{II});$$

$$D_{II} \cdot (h_{II} - h'_{II}) = (D - D_{II}) \cdot (h'_{II} - h_k).$$

Введя определение доли отбора

$$\varphi_I = \frac{D_I}{D};$$

$$\varphi_{II} = \frac{D_{II}}{D}$$

Получим:

$$\varphi_I = \frac{h'_1 - h'_{II}}{h_1 - h'_1};$$

$$\varphi_{II} = \frac{h'_{II} - h_k}{h_{II} - h_k}.$$

Подставив, получим:

$$\varphi_I = \frac{899,2 - 510,7}{2797,4 - 510,7} = 0,17;$$

$$\varphi_{II} = \frac{510,7 - 137,7}{2708,3 - 137,7} = 0,145.$$

Полезная работа цикла составляет:

$$l_y = h_1 - h_2 - \varphi_I \cdot (h_1 - h_2) - \varphi_{II} \cdot (h_{II} - h_2);$$

$$l_y = 3166,8 - 2042,2 - 0,17 \cdot (2797,4 - 2042,2) - 0,145 \cdot (2708,3 - 2042,2) = 899,6 \text{ кДж/кг.}$$

Определим термический КПД при регенерации:

$$\eta_t = \frac{1}{h_1 - h'_t} \cdot (h_1 - h_2 - \varphi_I \cdot (h_1 - h_2) - \varphi_{II} \cdot (h_{II} - h_2)) = \frac{l_u}{h_1 - h'_t};$$

$$\eta_t = \frac{899,6}{3166,8 - 899,2} = 0,397.$$

Доля пара, проходящая через последнюю ступень турбины – поступающая в конденсатор:

$$\varphi_\kappa = 1 - \varphi_I - \varphi_{II};$$

$$\varphi_\kappa = 1 - 0,17 - 0,145 = 0,685.$$

Удельный расход пара на 1 кВт·ч работы:

$$D = \frac{1000}{l_u};$$

$$D = \frac{1000}{899,6} = 1,112 \text{ кг/МДж.}$$

Выполним график-схему располагаемого теплоперепада:

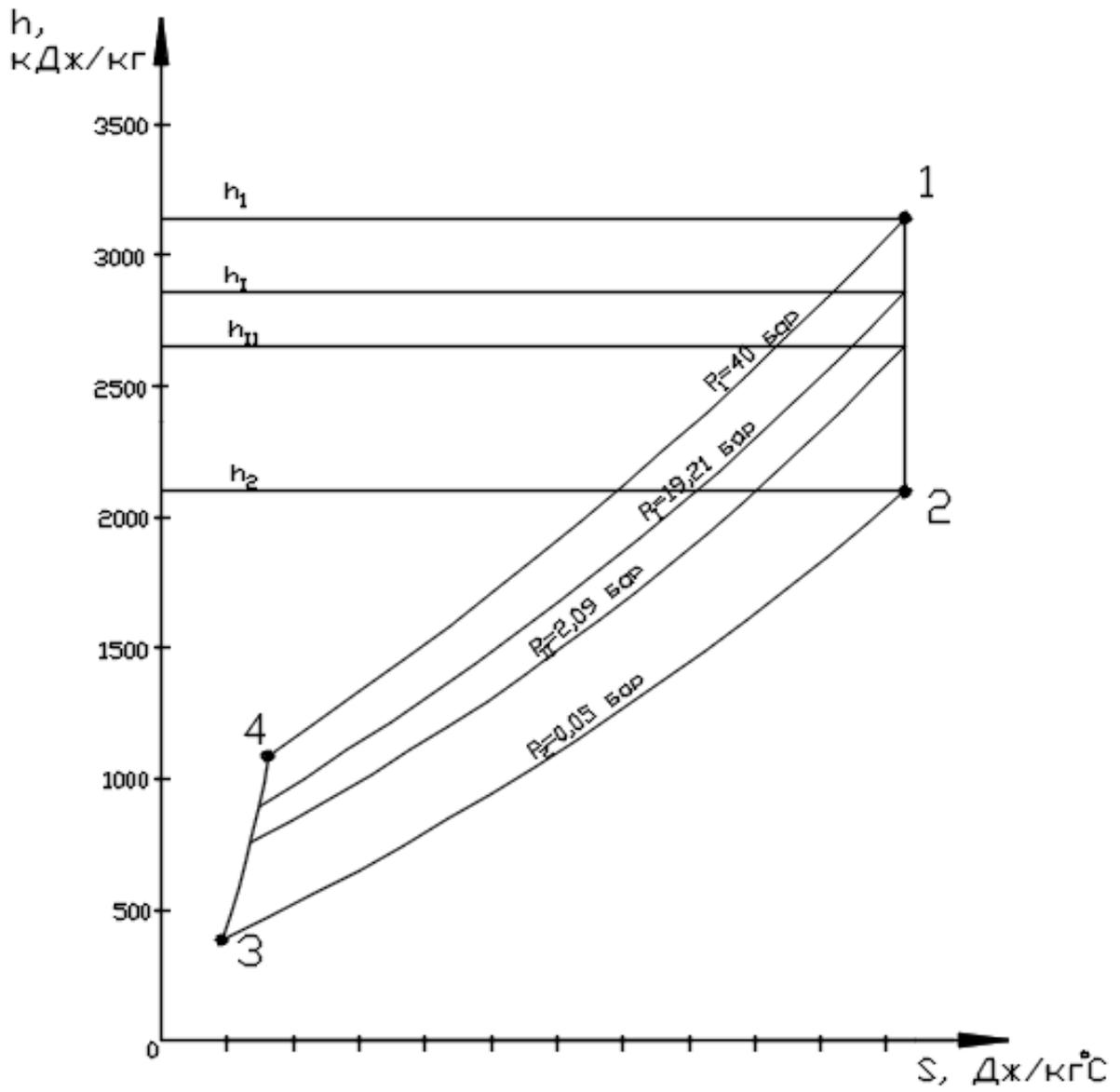


Рисунок 1 – График-схема располагаемого теплоперепада

Литература

1. Маханько М.Г. Техническая трмодинамика; Учеб.пособие, ч.1.- М.: МИИТ, 1987.-107 с.
2. Маханько М.Г., Костин А.В., Фроликов И.И. Задания и мтодические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Техническая трмодинамика»; Методические указания. –М.: МИИТ, 1990.-16 с.
3. Кондиционирование воздуха в пассажирских вагонах и на локомотивах. Маханько М.Г., Сидоров Ю.П., Хенач А., Шмидт М.М.: Транспорт, 1981, 254 с.