

Бондарь В.П.

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: ig-secr@i.com.ua

Условия минимального прироста энтропии в эквивалентных циклах Карно

С целью определения условий минимального прироста энтропии в эквивалентных циклах Карно в исходных данных для расчета, кроме основных общепринятых параметров, введен новый параметр — степень необратимости, который функционально связывает температуры источников тепла и граничные температуры цикла. Описаны условия достижения максимальной степени совершенства эквивалентного цикла Карно. Получены и проанализированы математические выражения, которые позволяют определить минимальное численное значение прироста энтропии и соответственно, максимальный коэффициент термодинамического совершенства эквивалентного цикла Карно. Результаты анализа подтверждены расчетами. *Библ. 6, рис. 2, табл. 7.*

Ключевые слова: цикл Карно, степень необратимости, энтропия, термодинамическая система, эксергия.

При разработке циклов теплосиловых и холодильных машин основной задачей является определение термодинамических параметров, при которых степень совершенства цикла достигает возможно большего значения. Поставленная задача общепринятыми методами решается достаточно трудно [1, 2].

При исследовании эквивалентных циклов Карно основными параметрами являются: температуры верхнего и нижнего источников тепла; граничные температуры цикла и количество подведенного тепла к циклу. При известных температурах источников тепла задают численное значение граничных температур цикла, что приводит к единственному возможному решению.

В статье рассмотрен термодинамический метод анализа, позволяющий в эквивалентных циклах Карно с заданной степенью необратимости определить минимальное численное значение прироста энтропии термодинамической системы источники тепла — цикл, что соответствует максимально возможной работе цикла.

Приведенные примеры расчета эквивалентного цикла выполнены на основе представленного в статье метода анализа.

Метод анализа эквивалентных циклов Карно

Рассмотрен эквивалентный цикл Карно, графическое отображение которого представлено на рис.1.

Общепринятыми параметрами цикла являются [1, 2]:

$$T_1, T_0, T_2, T_3, Q_1, Q_2, \quad (1)$$

где T_1, T_0 — температуры верхнего и нижнего источников тепла; T_2 — температура верхней границы цикла, $T_2 = T_1 - \Delta T_1$; T_3 — температура нижней границы цикла, $T_3 = T_0 + \Delta T_2$; $\Delta T_1, \Delta T_2$ — разность температур между источниками тепла и границами цикла; Q_1 — количество подведенного тепла к циклу; Q_2 — количество отведенного тепла из цикла.

Для обеспечения взаимосвязи граничных температур цикла с температурами источников тепла и с целью определения численного значения необратимости цикла в основные параметры (1) введен новый параметр τ_m — степень необратимости цикла [3]:

$$\begin{aligned} \tau_m &= (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln (\Delta T_1 / \Delta T_2) = \\ &= [(T_1 - T_2) - (T_3 - T_0)] / \\ & \quad / \ln [(T_1 - T_2) / (T_3 - T_0)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Поскольку степень необратимости цикла τ_m зависит от температур источников тепла T_1, T_0 и граничных температур цикла T_2 и T_3 (рис.1), то параметр τ_m является термодинамическим.

Приняты температуры источников тепла T_1, T_0 , степень необратимости цикла τ_m и количество подведенного тепла Q_1 неизменными параметрами, а граничные температуры цикла T_2 и T_3 — в качестве переменных.

Введение степени необратимости в анализ необратимых циклов, как будет показано ниже, приводит к качественно новому результату.

Верхняя и нижняя разность температур между источниками тепла и границами цикла

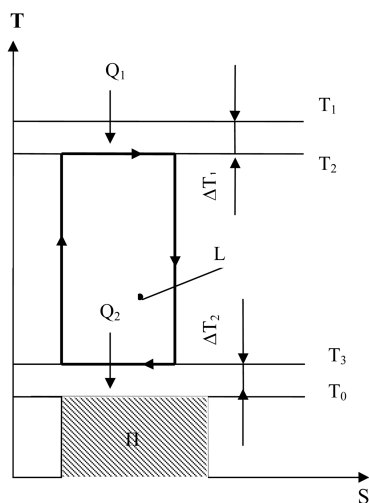


Рис.1. Эквивалентный цикл Карно.

обозначены через x , а отношение температуры верхнего источника тепла к нижнему источнику (окружающей среде) – через y :

$$x = \Delta T_1 / \Delta T_2; y = T_1 / T_0.$$

С учетом принятых обозначений выражение (2) примет вид:

$$\tau_m = \Delta T_2 (x - 1) / \ln x. \quad (3)$$

Прирост энтропии термодинамической системы (см. рис.1) определяется как

$$\sum \Delta S_c = -\Delta S_1 + \Delta S_2 - \Delta S_3 + \Delta S_0,$$

где $-\Delta S_1$ – убыль энтропии верхнего источника тепла, $-\Delta S_1 = -Q_1/T_1$; ΔS_2 – прирост энтропии цикла, $\Delta S_2 = Q_1/T_2$; $-\Delta S_3$ – убыль энтропии цикла, $-\Delta S_3 = -Q_2/T_3$; ΔS_0 – прирост энтропии нижнего источника тепла (окружающей среды), $\Delta S_0 = Q_2/T_0$.

Поскольку в обратимом и эквивалентном циклах Карно [1] $\Delta S_2 = |-\Delta S_3|$, то прирост энтропии термодинамической системы

$$\sum \Delta S_c = \Delta S_0 - \Delta S_1. \quad (4)$$

С учетом вышеизложенного и принятых начальных условий получим, что

$$-\Delta S_1 = -Q_1/T_1 = -Q_1/(y T_0);$$

$$\Delta S_0 = Q_2/T_0 = (\Delta S_2 T_3)/T_0 =$$

$$= (Q_1 T_3)/(T_0 T_2);$$

$$\sum \Delta S_c = (Q_1/T_0) / [(T_3/T_2) - 1/y]. \quad (5)$$

Для верхней и нижней температур цикла с учетом выражения (3) получим:

$$T_2 = T_1 - \Delta T_1 = y T_0 - [\tau_m x \ln x / (x - 1)]; \quad (6)$$

$$T_3 = T_0 + \Delta T_2 = T_0 + [\tau_m \ln x / (x - 1)]. \quad (7)$$

Выражение (5) для определения прироста энтропии термодинамической системы с учетом (6) и (7) примет вид:

$$\sum \Delta S_c = \frac{Q_1}{T_0} \left\{ \frac{T_0 + [\tau_m \ln x / (x - 1)]}{y \cdot T_0 - [\tau_m x \ln x / (x - 1)]} - y^{-1} \right\}. \quad (8)$$

Продолжим дальнейшее исследование на примерах с конкретными значениями параметров термодинамического процесса. Во всех рассмотренных ниже примерах 1–3 неизменными приняты такие параметры: $Q_1 = 36000$ кДж; $T_0 = 290$ К; $\tau_m = 60$ К.

Численные значения параметров, определенных энтропийным методом в работе [2], приведены в табл.1–4 и отображены на графиках (рис.2).

При этом $\sum \Delta S_c$ – прирост энтропии термодинамической системы; E_1 – эксергия подвода тепла Q_1 к циклу, $E_1 = Q_1 - T_0 \Delta S_1$; E_2 – эксергия отвода тепла из цикла; $E_2 = Q_2 - T_0 \Delta S_3$; Q_2 – отвод тепла из цикла, $Q_2 = |T_3 \Delta S_3| = |T_3 \Delta S_2|$; L – работа цикла, $L = (T_2 - T_3) \Delta S_2 = E_1 - \Pi = Q_1 - Q_2$; Π – эксергетические потери, $\Pi = T_0 \sum \Delta S_c$; η_c – коэффициент термодинамического совершенства [2], $\eta_c = (E_1 - \Pi) / E_1 = L / E_1$.

Пример 1. Вычисление параметров эквивалентного цикла Карно

Приняты такие значения: $T_1 = 1800$ К; $\ln x = 0,5$; $x = 1,6487$.

В результате вычислений с учетом выражений (3), (6)–(8) и введенных соотношений $x = \Delta T_1 / \Delta T_2$; $y = T_1 / T_0$, численные значения параметров равны:

$$y = 1800 / 290 = 6,206; 1/y = 0,1611;$$

$$\Delta T_2 = \tau_m [1 / (x - 1)] \ln x =$$

$$= 60 [1 / 0,6487] \cdot 0,5 = 46,246 \text{ К.}$$

$$\Delta T_1 = x \Delta T_2 = 76,246 \text{ К;}$$

$$T_3 = T_0 + \Delta T_2 = 290 + 46,246 = 336,246 \text{ К;}$$

$$T_2 = T_1 - \Delta T_1 = 1800 - 76,246 = 1723,75 \text{ К.}$$

Результаты расчетов сведены в табл.1.

Прирост энтропии системы

Подставив значения граничных температур цикла из табл.1 (п.1): $T_3 = 336,246$ К; $T_2 = 1723,75$ К в выражение (5) при начальных параметрах $Q_1 = 36000$ кДж; $T_0 = 290$ К; $T_1 = 1800$ К, получим:

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta S_c &= (Q_1/T_0) [(T_3/T_2) - 1/y] = \\ &= (3600/290) (336,246/1723,75 - \\ &\quad - 0,1611) = 4,2118 \text{ кДж/К.} \end{aligned}$$

Таким образом, численное значение $\Sigma \Delta S_c$ совпадает со значением, вычисленным с использованием выражения (8), (см. табл.2, п.1), поскольку в него входят все параметры, приведенные в табл.1.

Таблица 1. Рассчитанные параметры цикла Карно

| N_p, N_{Π} | x | ln x | ΔT_2 | ΔT_1 | T_3 | T_2 |
|----------------|--------|--------|--------------|--------------|----------|-----------|
| 1 | 1,6487 | 0,5 | 46,24 | 76,246 | 336,246 | 1723,75 |
| 2 | 2,7183 | 1,0 | 34,918 | 94,92 | 324,918 | 1705,08 |
| 3 | 7,3891 | 2,0 | 18,78 | 138,78 | 308,78 | 1661,22 |
| 4 | 10,0 | 2,3026 | 15,35 | 153,507 | 305,35 | 1646,49 |
| 5 | 11,0 | 2,3979 | 14,3874 | 158,2614 | 304,554 | 1641,7386 |
| 6 | 12,0 | 2,4849 | 13,554 | 162,648 | 303,554 | 1637,352 |
| 7 | 13,0 | 2,5649 | 12,8245 | 166,7185 | 302,8245 | 1633,2815 |
| 8 | 20,08 | 3,0 | 9,43 | 189,4 | 299,4 | 1610,6 |
| 9 | 54,6 | 4,0 | 4,5 | 244,5 | 294,5 | 1555,5 |

Таблица 2. Параметры, определенные энтропийным методом, в зависимости от температуры $T_1 = 1800$ К

| N_p, N_{Π} | x/ln x | $\Sigma \Delta S_c$ | Q_2 | E_1 | E_2 | $\Pi = T_0 \Sigma \Delta S_c$ | $(L = E_1 - \Pi) / (L = Q_1 - Q_2)$ | $\eta_c = L/E_1$ |
|----------------|-------------|---------------------|--------|-------|-------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 1 | 1,6482/0,5 | 4,2118 | 7022 | 30200 | 966 | 1221,422 | 28978,58/28978 | 0,9595 |
| 2 | 2,7183/1,0 | 3,6529 | 6860 | 30200 | 737 | 1059,341 | 29140,66/29140 | 0,9649 |
| 3 | 7,3891/2,0 | 3,0723 | 6692 | 30200 | 407 | 890,967 | 29309,3/29308 | 0,9705 |
| 4 | 10,0/2,3026 | 3,0200 | 6676 | 30200 | 336 | 875,811 | 29324,19/29324 | 0,97100 |
| 5 | 11,0/2,3979 | 3,0139 | 6674,6 | 30200 | 315 | 874,031 | 29325,97/29325,4 | 0,97106 |
| 6 | 12,0/2,4849 | 3,0124 | 6674,1 | 30200 | 298 | 873,596 | 29326,40/29325,9 | 0,97107 |
| 7 | 13,0/2,5649 | 3,0143 | 6674,5 | 30200 | 283 | 874,147 | 29325,85/29307 | 0,97105 |
| 8 | 20,0855/3,0 | 3,0772 | 6693 | 30200 | 210 | 892,388 | 29307,61/29307 | 0,9704 |
| 9 | 54,5981/4,0 | 3,4982 | 6815 | 30200 | 104 | 1014,478 | 29185,52/29185 | 0,9664 |

Таблица 3. Параметры, определенные энтропийным методом, в зависимости от температуры $T_1 = 900$ К

| N_p, N_{Π} | x/ln x | $\Sigma \Delta S_c$ | Q_2 | E_1 | E_2 | $\Pi = T_0 \Sigma \Delta S_c$ | $(L = E_1 - \Pi) / (L = Q_1 - Q_2)$ | $\eta_c = L/E_1$ |
|----------------|-----------|---------------------|----------|-------|-------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 1 | 1,0/0,0 | 11,7114 | 15000,00 | 24400 | 2571 | 3396 | 21004/21000 | 0,8608 |
| 2 | 2,72/1,0 | 10,0919 | 14529,00 | 24400 | 1560 | 2927 | 21473/21471 | 0,8800 |
| 3 | 3,9/1,361 | 9,9743 | 14494,98 | 24400 | 1283 | 2892,55 | 21507,4/21505 | 0,8814 |
| 4 | 4,0/1,386 | 9,9728 | 14495,24 | 24400 | 1265 | 2892,11 | 21507,9/21504,8 | 0,8815 |
| 5 | 4,1/1,411 | 9,9771 | 14495,80 | 24400 | 1247 | 2893,36 | 21506,6/21504,2 | 0,8814 |
| 6 | 7,39/2,0 | 10,346 | 14603,00 | 24400 | 888 | 3000 | 21400/21397 | 0,8770 |
| 7 | 20,1/3,0 | 12,3102 | 15174,00 | 24400 | 478 | 3570 | 20830/20826 | 0,8537 |

Таблица 4. Параметры, определенные энтропийным методом, в зависимости от температуры $T_1 = 450$ К

| N_p, N_{Π} | x/ln x | $\Sigma \Delta S_c$ | Q_2 | E_1 | E_2 | $\Pi = T_0 \Sigma \Delta S_c$ | $(L = E_1 - \Pi) / (L = Q_1 - Q_2)$ | $\eta_c = L/E_1$ |
|----------------|------------|---------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| 1 | 0,5/-0,693 | 33,3944 | 32894 | 12800 | 7331 | 9684 | 3116/3106 | 0,2434 |
| 2 | 1,0/0,0 | 31,3764 | 32308 | 12800 | 5539 | 9099,2 | 3701/3692 | 0,2891 |
| 3 | 1,1/0,095 | 31,3101 | 32288 | 12800 | 5318 | 9080,0 | 3720/3712 | 0,2906 |
| 4 | 1,2/0,182 | 31,2972 | 32285 | 12800 | 5123 | 9076,2 | 3724/3715 | 0,2909 |
| 5 | 1,3/0,262 | 31,3261 | 32294 | 12800 | 4950 | 9084,6 | 3715/3706 | 0,2903 |
| 6 | 1,4/0,336 | 31,3884 | 32311 | 12800 | 4789 | 9102,6 | 3697/3689 | 0,2889 |
| 7 | 1,5/0,405 | 31,4772 | 32328 | 12800 | 4646 | 9128,4 | 3672/3672 | 0,2868 |
| 8 | 2,0/0,693 | 32,1843 | 32544 | 12800 | 4083 | 9333,4 | 3467/3456 | 0,2708 |
| 9 | 2,718/1,0 | 33,5608 | 32940 | 12800 | 3540 | 9732,6 | 3067/3060 | 0,2396 |

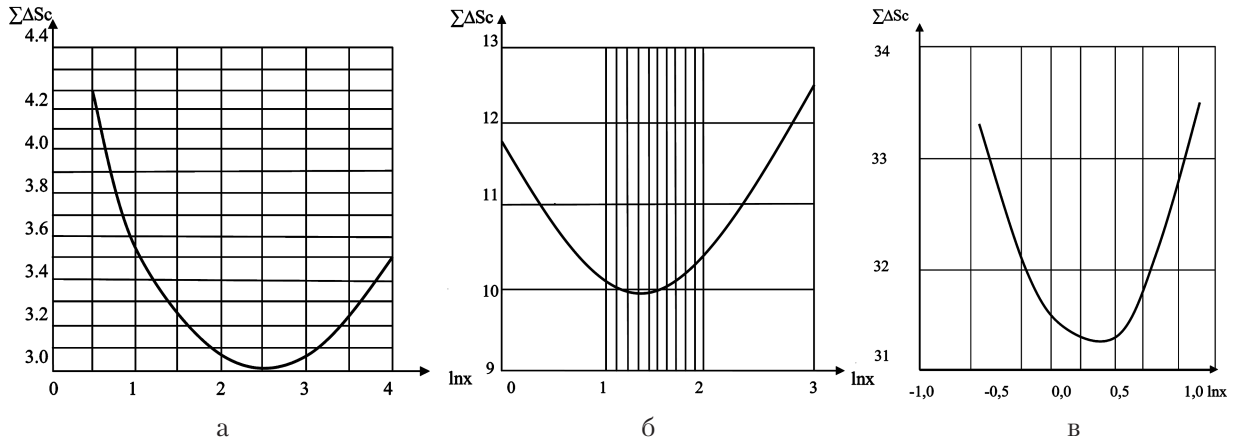


Рис.2. Зависимости прироста энтропии системы (источники тепла – эквивалентный цикл Карно) от $x = \Delta T_1/\Delta T_0$ при разных T_1 , К: а – 1800; б – 900; в – 450.

Количество отведенного тепла из цикла

В обратимых и эквивалентных циклах Карно [2] изменение энтропии на верхней границе цикла ΔS_2 по абсолютной величине равно изменению энтропии на нижней границе $|\Delta S_3|$ (знак минус указывает на отвод тепла) (см. рис.1):

$$\Delta S_2 = |\Delta S_3|,$$

где $\Delta S_2 = Q_1/T_2$; $|\Delta S_3| = Q_2/T_3$.

Значение тепла Q_2 можно определить следующим образом:

$$Q_2 = T_3 |\Delta S_3| = T_3 \Delta S_2 = T_3(Q_1/T_2). \quad (9)$$

Параметры $T_3 = 336,246$ К, $T_2 = 1723,75$ К взяты из табл.1 (п.1).

В результате вычислений получим

$$Q_2 = 336,246 \cdot 36000/1723,75 = 7022 \text{ кДж.}$$

Эксергия E_1 подвода тепла Q_1 к циклу

Согласно [2],

$$E_1 = Q_1 - \Pi_0 = Q_1 - T_0(Q_1/T_1),$$

$$\Pi_0 = T_0(Q_1/T_1),$$

где Π_0 – неработоспособная часть тепла Q_1 обратимого и необратимого цикла.

При этом, если $T_1 = \text{const}$, то $E_1 = \text{const}$. Для данного примера эксергия (работоспособная часть тепла Q_1 на входе в цикл) $E_1 = 36000 - 290 \cdot 36000/1800 = 30200$ кДж.

Потери эксергии Π [2]

$$\Pi = T_0 \Sigma \Delta S_c = 290 \cdot 4,2118 = 1221,422 \text{ кДж.}$$

Работа цикла

$$L = E_1 - \Pi = 30200 - 1221,422 = 28978,58 \text{ кДж.}$$

Коэффициент термодинамического совершенства [2]

$$\eta_c = L/E_1 = 28978,58/30200 = 0,9595.$$

Эксергия E_2 отвода тепла из цикла

$$E_2 = Q_2 - T_0(Q_2/T_3) =$$

$$= 7022 - 290 \cdot (7022/336,246) = 966 \text{ кДж.}$$

В том случае, если бы эксергия E_2 была направлена на совершение работы, то потери эксергии в цикле составили бы величину:

$$\Pi_1 = E_1 - L - E_2 =$$

$$= 30200 - 28978,58 - 966 = 255,42 \text{ кДж.}$$

В нашем случае (см. рис.1), согласно циклу Карно и выражению (8), эксергия E_2 относится к потерянной, поэтому

$$\Pi = \Pi_1 + E_2 = 255,42 + 966 = 1221,42 \text{ кДж.}$$

Примеры вычисления термодинамических параметров при различных x и y сведены в табл.1–4 и отображены на графиках (рис.2).

Пример 2. Определение параметров теплового парового цикла Ренкина [1]

Исходные данные принимаются из работы [1] и рис.1.

Задано $Q_1 = 36000$ кДж; $T_1 = 2273$ К; $T_2 = 823$ К; $T_3 = 301,6$ К; $T_0 = 283$ К.

Степень необратимости цикла

$$\tau_m = (\Delta T_1 - \Delta T_2)/\ln(\Delta T_1/\Delta T_2) = 328,$$

при этом $x = \Delta T_1/\Delta T_2 = 78$;

$$\Delta T_2 = \tau_m \ln x/(x - 1) = 18,6 \text{ К;}$$

$$\Delta T_1 = x \Delta T_2 = 1450 \text{ К;}$$

$$T_2 = T_1 - \Delta T_1 = 2273 - 1450 = 823 \text{ К};$$

$$T_3 = T_0 + \Delta T_2 = 283 + 18,6 = 301,6 \text{ К};$$

$$y = T_1/T_2 = 8,03; y^{-1} = 0,1245.$$

Прирост энтропии термодинамической системы по формуле (8):

$$\Sigma \Delta S_c = 127,21 \cdot \{ [283 + 328 \cdot \ln 78 / (78 - 1)] / [2273 - 328 \cdot 78 \cdot \ln 78 / (78 - 1)] - 0,1245 \} = 30,4022 \text{ кДж/К}.$$

Эксергия цикла

$$E_1 = Q_1 - T_0 \Delta S_1;$$

$$\Delta S_1 = -36000 / 2273 = -15,8381 \text{ кДж/К};$$

$$E_1 = 36000 - 283 \cdot 15,8381 = 36000 - 4482,1821 = 31517,818 \text{ кДж}.$$

Прирост энтропии ΔS_2

$$\Delta S_2 = Q_1/T_2 = 36000/823 = 43,7424 \text{ кДж/К}.$$

Отвод тепла из цикла

$$Q_2 = |-T_3 \Delta S_3| = |-T_3 \Delta S_2| = 301,6 \cdot 43,7424 = 13192,71 \text{ кДж}.$$

Потери эксергии в цикле

$$\Pi = T_0 \cdot \Sigma \Delta S_c = 283 \cdot 30,4022 = 8603,83 \approx 8604 \text{ кДж}.$$

Работа цикла

а) $L = E_1 - \Pi = 31518 - 8604 = 22914 \text{ кДж}$ (разница = 0,5 %);
 б) $L = Q_1 - Q_2 = 36000 - 13193 = 22807 \text{ кДж}.$

Прирост энтропии тепла нижнего источника

$$\Delta S_0 = Q_2/T_0 = 13192/283 = 46,6148 \text{ кДж/К}.$$

Коэффициент термодинамического совершенства цикла

$$\eta_c = (E_1 - \Pi)/E_1 = (31517,8 - 8604)/31517,8 = 22914/31517,8 = 0,7270.$$

Рассчитанные параметры цикла Ренкина приведены ниже:

| | | |
|------------------------------------|---|----------|
| $\Delta T_2, \text{ К}$ | — | 18,6 |
| $\Delta T_1, \text{ К}$ | — | 1450 |
| $\tau_m, \text{ К}$ | — | 328 |
| $\Sigma \Delta S_c, \text{ кДж/К}$ | — | 30,4022 |
| $E_1, \text{ кДж}$ | — | 31517,82 |
| $\Pi, \text{ кДж}$ | — | 8603,83 |
| $Q_2, \text{ кДж}$ | — | 13193 |
| $L, \text{ кДж}$ | — | 22914 |
| η_c | — | 0,7270 |

Таблица 5. Определение $\Delta T_1, \Delta T_2, T_3, T_2$ при различных значениях x

| №№ п/п | x | lnx | $\Delta T_1, \text{ К}$ | $\Delta T_2, \text{ К}$ | $T_3, \text{ К}$ | $T_2, \text{ К}$ |
|--------|----|--------|-------------------------|-------------------------|------------------|------------------|
| 1 | 2 | 0,6931 | 227,35 | 454,7 | 510,3 | 1818,3 |
| 2 | 4 | 1,3863 | 151,16 | 606,27 | 434,16 | 1666,7 |
| 3 | 6 | 1,7918 | 117,54 | 705,2 | 400,5 | 1567,7 |
| 4 | 8 | 2,0794 | 97,4 | 779,5 | 380,4 | 1493,52 |
| 5 | 10 | 2,3026 | 83,92 | 839,2 | 366,9 | 1433,8 |
| 6 | 20 | 2,9957 | 51,7 | 1034,3 | 335 | 1238,7 |
| 7 | 40 | 3,6889 | 31,0 | 1241 | 314 | 1032,0 |
| 8 | 70 | 4,2485 | 20,2 | 1414 | 303,2 | 859,3 |

Таблица 6. Термодинамические параметры эквивалентного цикла Карно,

| №№ п/п | x | lnx | $\Delta S_2 = \Delta S_3 $ | $\Sigma \Delta S_c$ | Q_2 | E_1 | E_2 | $\Pi = T_0 \cdot \Sigma \Delta S_c$ | $L = E_1 - \Pi$ | $\eta_c = L/E_1$ |
|--------|----|--------|-----------------------------|---------------------|----------|----------|---------|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| 1 | 2 | 0,6931 | 19,7987 | 19,9292 | 10103,3 | 31517,82 | 4500,27 | 5640 | 25877,82 | 0,8211 |
| 2 | 4 | 1,3863 | 21,5996 | 17,3939 | 9377,7 | 31517,82 | 3265,01 | 4922,5 | 26595,32 | 0,8438 |
| 3 | 6 | 1,7918 | 22,9636 | 16,7265 | 9196,91 | 31517,82 | 2698,21 | 4733,6 | 26784,22 | 0,8498 |
| 4 | 8 | 2,0794 | 24,1041 | 16,6289 | 9169,211 | 31517,82 | 2347,74 | 4705,98 | 26811,84 | 0,8507 |
| 5 | 10 | 2,3026 | 25,1081 | 16,7790 | 9212,2 | 31517,82 | 2106,61 | 4748,46 | 26769,36 | 0,8493 |
| 6 | 20 | 2,9957 | 29,0627 | 18,6501 | 9736,0 | 31517,82 | 1511,25 | 5277,98 | 26239,84 | 0,8325 |
| 7 | 40 | 3,6889 | 34,8837 | 22,9338 | 10953,5 | 31517,82 | 1081,4 | 6490,26 | 25027,56 | 0,7941 |
| 8 | 70 | 4,2485 | 41,8946 | 29,1016 | 12702,4 | 31517,82 | 846,24 | 8235,75 | 23282,1 | 0,7387 |

Пример 3. Анализ эквивалентного цикла Карно по данным цикла Ренкина

В эквивалентном цикле Карно

$$|\Delta S_{1,2}| = |\Delta S_{3,4}| = \Delta S_2 = |\Delta S_3| = 43,7424 \text{ кДж/К.}$$

Исходные параметры: $Q_1 = 36000 \text{ кДж}$; $T_0 = 283 \text{ К}$; $T_1 = 2273 \text{ К}$; $\tau_m = 328 \text{ К}$.

Температуры цикла T_2 и T_3 — переменные величины, где $x = T_2/T_3$, $T_1/T_0 = 8,03 = y$.

Термодинамические параметры эквивалентного цикла Карно, вычисленные по данным табл.5, сведены в табл.6.

Согласно табл.6, максимум работы эквивалентного цикла Карно достигнут при $x = 8$: $\eta_{c^8} = 0,8507$; работа $L_8 = 26812 \text{ кДж}$.

Согласно [1], $x = 78$; $\eta_{c^{78}} = 0,7270$; $L_{78} = 22914 \text{ кДж}$.

Разность работ $L_8 - L_{78} = 26812 - 22914 = 3898 \text{ кДж}$.

Значение L_8 для данного примера — это теоретически максимально возможная работа с заданной степенью необратимости $\tau_m = 328 \text{ К}$ без учета внутренней необратимости цикла.

Выводы

Приведенные примеры расчета эквивалентного цикла выполнены на основе представленного в статье метода.

Особенностью предложенного метода анализа по исходным общепринятым параметрам цикла является учет функциональной связи температур источников тепла с граничными температурами цикла через введенный термодинамический параметр τ_m — степень необратимости цикла.

Именно учет этой связи позволяет определить условия минимального прироста энтропии эквивалентного цикла Карно при неизменной степени необратимости.

Достичь того же результата с применением только параметров T_1 , T_0 , T_2 , T_3 , Q_1 , Q_2 весьма сложно, поскольку при неизменных температурах T_1 и T_0 источников тепла необходимо для каждого конкретного варианта расчета задавать новые значения граничных температур цикла, что, как следствие, приведет к изменению разности температур между источниками тепла и циклом, а также к изменению степени необратимости термодинамической системы в целом.

Результаты расчетов, представленных в таблицах и отображенных графически, нагляд-

но показывают, что прирост энтропии системы, как функции по аргументу x , проходит через минимум во всех рассмотренных примерах. Но численное значение x при минимальном значении функции $\Sigma \Delta S_c$ зависит от численного значения температуры T_1 верхнего источника тепла.

В рассмотренных случаях рассчитано:

пример 1 (табл.2, рис.2,а) — $\Sigma \Delta S_c \min$ при $x \approx 12$; $T_1 = 1800 \text{ К}$;

пример 2 (табл.3, рис.2,б) — $\Sigma \Delta S_c \min$ при $x \approx 4$; $T_1 = 900 \text{ К}$;

пример 3 (табл.4, рис.2, в) — $\Sigma \Delta S_c \min$ при $x \approx 1,2$; $T_1 = 450 \text{ К}$.

Условные обозначения

| | |
|---------------------|---|
| E_1 | — эксергия подвода тепла к циклу, кДж |
| E_2 | — эксергия отвода тепла из цикла, кДж |
| L | — работа цикла, кДж |
| Q_1 | — подведенное тепло к циклу, кДж |
| Q_2 | — отведенное тепло из цикла, кДж |
| ΔS | — прирост энтропии, кДж/К |
| $\Sigma \Delta S_c$ | — прирост энтропии термодинамической системы, кДж/К |
| T_1 | — температура верхнего источника тепла, К |
| T_0 | — температура нижнего источника тепла, К |
| T_2 | — температура верхней границы цикла, К |
| T_3 | — температура нижней границы цикла, К |
| ΔT | — разность температур, К |
| τ_m | — степень необратимости цикла, К |
| x | — отношение разности температур источников тепла и цикла |
| y | — отношение температур верхнего к нижнему источнику тепла |
| η_c | — коэффициент термодинамического совершенства |
| Π | — эксергетические потери, кДж |

Список литературы

1. Кириллин В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кириллин, В.В.Сычев, А.Е. Шейндлин. — М.: Энергия, 1974. — 447 с.
2. Гохштейн Д.П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. — М.: Энергия, 1969. — 367 с.
3. Михеев М.А. Основы теплопередачи. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949. — 350 с.
4. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. — Київ: Техніка, 2006. — 320 с.
5. Мартыновский В.С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов. — М.: Энергия, 1979. — 284 с.
6. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г. и др. — М.; Л.: Госэнергиздат, 1963. — 416 с.

Поступила в редакцию 20.07.15

Бондар В.П.

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 04113 Київ, Україна, e-mail: ig-secr@i.com.ua

Умови мінімального приросту ентропії у еквівалентних циклах Карно

З метою визначення умов мінімального приросту ентропії в еквівалентних циклах Карно у вихідних даних для розрахунку, крім основних загальноприйнятих параметрів, введено новий параметр — ступінь незворотності, який функціонально пов'язує температури джерел тепла та граничні температури циклу. У цій статті описано умови досягнення максимального ступеня досконалості еквівалентного циклу Карно. Отримано та проаналізовано математичні вирази, які дозволяють визначити мінімальне чисельне значення приросту ентропії та відповідно максимальний коефіцієнт термодинамічної досконалості еквівалентного циклу Карно. Результати аналізу підтверджено розрахунками. *Бібл. 6, рис. 2, табл. 6.*

Ключові слова: ступінь незворотності, цикл Карно, ентропія, термодинамічна система.

Bondar V.P.

The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev

39, Degtyarevskaya Str., 04113 Kiev, Ukraine, e-mail: ig-secr@i.com.ua

Conditions of Minimal Increment of Entropy in Equivalent Carnot Cycles

In order to determine the conditions of minimal entropy increase in equivalent Carnot cycle a new parameter — the degree of irreversibility, which functionally connects the heat source and the boundary temperature cycle, was put in the initial data for the calculation, in addition to conventional basic parameters. This article describes the conditions for the maximum level of equivalent Carnot cycle perfection achieving. We obtained and analyzed mathematical expressions that allow us to determine the numerical value of the minimum entropy increment and accordingly, the maximum coefficient of thermodynamic equivalent Carnot cycle perfection. Results of the analysis confirmed the calculations. *Bibl. 6, Fig. 2, Table 6.*

Key words: degree of irreversibility, Carnot cycle, entropy, thermodynamic system.

References

1. Kirillin V.A., Sychev V.V., Shejndlin A.E. Tehnicheskaja termodinamika, Moscow : Jenergija, 1974, 447 p. (Rus.)
2. Gohshtejn D.P. Sovremennye metody termodinamicheskogo analiza jenergeticheskikh ustanovok, Moscow : Jenergija, 1969, 367 p. (Rus.)
3. Miheev M.A. Osnovy teploperedachi, Moscow; Leningrad : Gosjenergoizdat, 1949, 596 p. (Rus.)
4. Buljandra O.F. Tehnichna termodinamika, Kiev : Tekhnika, 2006, 320 p. (Rus.)
5. Martynovskij V.S. Cikly, shemy i harakteristiki termotransformatorov, Moscow : Jenergija, 1979, 284 p. (Rus.)
6. Malkov M.P., Danilov I.B., Zel'dovich A.G., Moscow; Leningrad : Gosjenergoizdat, 1963, 416 p. (Rus.)

Received July 20, 2015