

## Тепловой насос с двухступенчатым конденсатором

Боровков В. М., доктор техн. наук, Аль Алавин А. А., инж.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Термодинамический анализ является инструментом для определения производительности любой системы преобразования энергии (включая холодильные установки и тепловые насосы) и ее совершенствования. В обусловленной экономической ситуации, когда известны топливные, капитальные и эксплуатационные затраты и расходы на хозяйственно-техническое обслуживание системы, применение термодинамического анализа позволяет находить технические способы увеличения эффективности использования энергии и пути достижения новых результатов. Метод энтропии — это вычисление и анализ изменения энтропии во всех частях исследуемой системы. Некоторые части (подсистемы) могут быть исключены из системы, но они должны быть связаны с ней во время операции анализа. Вычисление полного произведения энтропии и деструкции эксергии в системе необходимо для определения реальной мощности, потребляемой холодильными установками и тепловыми насосами (ТН). Другими словами, для того, чтобы определить реальную мощность (на привод компрессора), необходим расчет полного произведения энтропии и деструкции эксергии в рассматриваемой системе.

С термодинамической точки зрения разность температур между потоками теплоносителя в теплообменнике играет важную роль в определении эффективности процесса теплообмена. С увеличением разности температур потери эксергии возрастают, что приводит к снижению КПД теплообменника и КПД самой установки.

Конденсатор теплового насоса — это теплообменный аппарат, в котором происходит нагрев источника высокопотенциальной теплоты (ИВПТ) — воды или воздуха — конденсационным хладагентом. Он является основным элементом теплового насоса и во многом определяет его технико-экономические показатели. Поэтому для повышения эксергетического КПД теплонасосной установки (ТНУ) в целом необходимо увеличивать его эффективность. В конденсаторе значительная часть эксергии, подведенной к ТНУ в виде электроэнергии, теряется из-за необратимого теплообмена. Но

при использовании отводимой теплоты для теплоснабжения или других полезных целей эта потеря эксергии может быть существенно снижена, если установить перед конденсатором противоточный охладитель перегретого пара (схема двухступенчатого конденсатора), работающий с небольшой конечной разностью температур [1, 2].

В данной статье предлагается применить метод “энтропия-цикл” (ЭЦМ) для анализа замещения одноступенчатой конденсации в ТН двухступенчатой.

Особенность эксергетического метода заключается в совместном анализе качественных и количественных характеристик разных видов энергии, вырабатываемых в комбинированном цикле. Это достигается использованием эксергии в качестве основы для их сопоставления [3].

В соответствии с концепциями Клаузиуса, Гюи и Стодола теоретическая потеря эксергии (работоспособности) определяется по формуле [4, 5]

$$\Delta E = T_{oc} \sum_{i=1}^n \Delta s'_i, \quad (1)$$

где  $T_{oc}$  — температура окружающей среды, К;  $\sum_{i=1}^n \Delta s'_i$  — суммарный рост энтропии вследствие необратимости теплообмена во всех  $n$  подсистемах, т. е. во всех элементах или агрегатах исследуемой установки.

Эксергетический баланс для  $k$ -го элемента в рассматриваемой системе [6]

$$E_{Fk} = E_{Pk} + \Delta E_k, \quad (2)$$

где  $E_{Fk}$ ,  $E_{Pk}$  — эксергии топлива и продукции, кДж;  $\Delta E_k$  — сумма деструктивной эксергии  $E_{Dk}$  и потери эксергии  $E_{Lk}$  в  $k$ -м элементе. При идеальных условиях  $E_{Dk} = 0$  и значение  $E_{Lk}$  определяется по формуле (1).

Метод “энтропия-цикл”. Термодинамическую эффективность цикла можно определить по формуле [6]

$$\eta = \mu_{рассм} / \mu_{идеал} = \mu_{дейст} / \mu_{идеал}, \quad (3)$$

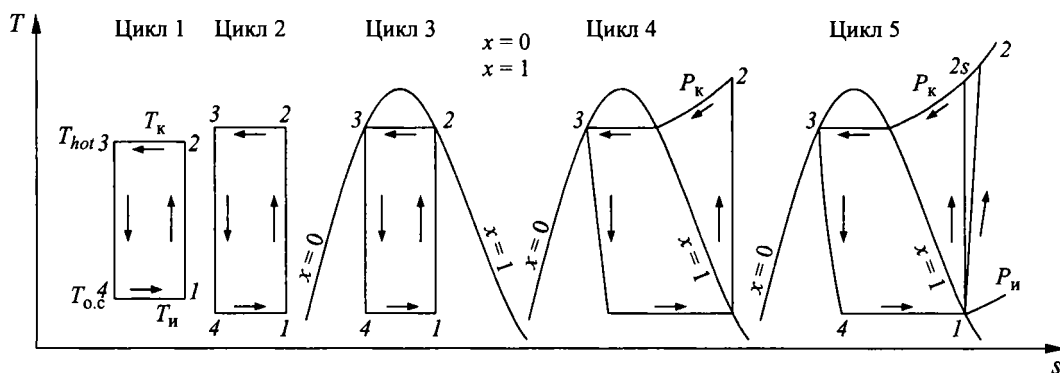


Рис. 1. Переход от цикла Карно к действительному циклу (при регенерации):

цикл 1 — цикл Карно; цикл 2 — необратимый цикл; цикл 3 — без перегрева; цикл 4 — с перегревом; цикл 5 — реальный цикл [6]

где  $\mu_{\text{рассм}}$ ,  $\mu_{\text{дейст}}$ ,  $\mu_{\text{идеал}}$  — коэффициенты преобразования рассматриваемого, действительного и идеального тепловых насосов.

Основными элементами ЭЦМ являются идеальный, модельный и реальный циклы. Идеальный цикл — это обратимый цикл, включающий в себя минимум необходимых элементов; для идеального цикла  $\eta = 1$ . Цикл Карно — традиционный идеальный цикл, с помощью которого с минимальными затратами работы можно перенести теплоту от источника низкопотенциальной теплоты (ИНПТ) к ИВПТ. Наличие необратимых потерь в обратном цикле ведет к увеличению затраченной работы, которая в этом случае определяется по формуле [7]

$$L_{\text{ц}} = L_{\text{min}} + \Delta L, \quad (4)$$

где  $L_{\text{min}}$  — работа, затраченная тепловым насосом, рабочее вещество которого совершает обратимый цикл;  $\Delta L$  — дополнительная работа, затраченная на компенсацию необратимых потерь.

Модельный цикл включает в себя все необходимые элементы с их необратимостью. Реальный (действительный) цикл описывает реальную систему, в состав которой входят все необходимые и дополнительные элементы с их необратимостью. Реальный цикл можно представить как результат, полученный после очередного изменения идеального обратимого цикла Карно (рис. 1).

Для анализа с использованием ЭЦМ очень важно правильное построение обратимого цикла, которое должно осуществляться исходя из следующих положений [8]:

процессы сжатия и расширения проходят обратимо;

теплообмен рабочего вещества с внешними источниками происходит при бесконечно малой разности температур;

количество теплоты, отдаваемое источнику высокой температуры в обратимом цикле, равно количеству этой же теплоты в рассматриваемом цикле.

Ниже приведены результаты анализа процессов в тепловых насосах с одно- и двухступенчатым конденсаторами.

**1. Тепловой насос с одноступенчатым конденсатором.** Предположим, что необходимо отвести теплоту от ИНПТ, характер изменения которой при температуре окружающей среды  $T_{\text{o.c}}$  показан на рис. 2, а. Для отвода теплоты используем обратный цикл (1-2-3-4-5). В нем имеются внешняя и внутренняя необратимости. Внутренние необратимости связаны с процессами, протекающими внутри системы, внешние — с условиями взаимодействия системы с окружающей средой и другими источниками и приемниками энергии [1, 9].

Следует учитывать, что анализ циклов проводится с помощью  $T-s$ -диаграммы, которая, как известно, составлена для 1 кг рабочего вещества. Чтобы определить необратимую потерю в конденсаторе теплового насоса, необходимо построить цикл с минимальной работой (обратимый цикл) по внешним источникам. Это цикл I-II-III-IV, где процессы сжатия и расширения идут обратимо (изотропно), теплообмен рабочего вещества с источниками происходит при бесконечно малых разностях температур. Теплопроизводительности обратимого цикла I-II-III-IV и рассматриваемого цикла одинаковы. При этом площади  $e-2-4-a-e$  и  $f-II-III-a-f$  равны.

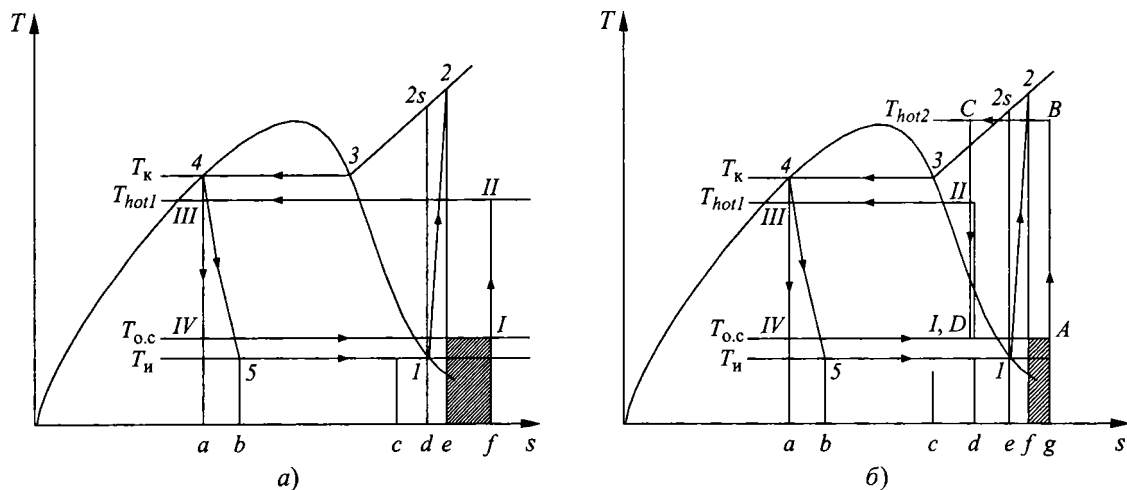


Рис. 2. ЭЦМ для теплового насоса с одноступенчатым (а) и двухступенчатым (б) конденсаторами

Расчетные выражения:

$$h_2 - h_4 = T_{hot1}(s_{II} - s_{III}) = T_{hot1}(s_f - s_4); \quad (5)$$

$$s_f = \frac{h_2 - h_4}{T_{hot1}} + s_4; \quad (6)$$

$$s_{вх.кон} = s_2; \quad s_{вых.кон} = s_4;$$

$$q_{доб.кон} = (h_2 - h_4); \quad T_{доб.кон} = T_{hot1};$$

$$s_{произ} = \sum m_{вых.кон} s_{вых.кон} - \sum m_{вх.кон} s_{вх.кон} +$$

$$+ \frac{q_{доб.кон}}{T_{hot1}} = m \left[ (s_4 - s_2) + \frac{h_2 - h_4}{T_{hot1}} \right], \quad (7)$$

где  $h$  — удельная энтальпия, кДж/кг;  $s$  — удельная энтропия, кДж/(кг · К);  $q_{доб.кон}$  — удельная теплота, отдаваемая конденсатором при температуре  $T_{hot1}$ , кДж/кг;  $m_{вых.кон} = m_{вх.кон} = m$  — расход рабочего тела в тепловом насосе, кг/с; индексы “вх.кон” и “вых.кон” обозначают на входе и выходе конденсатора.

Потери эксергии в конденсаторе:

$$e_{Джон} = T_{o.c} s_{произ.кон} = T_{o.c} \left[ (s_4 - s_2) + \frac{h_2 - h_4}{T_{hot1}} \right] =$$

$$= T_{o.c}(s_4 - s_2 + s_f - s_4) = T_{o.c}(s_f - s_2), \quad (8)$$

где  $s_{произ.кон}$  — произведенная в конденсаторе эксергия.

**2. Тепловой насос с двухступенчатым конденсатором (с конденсатором и охладителем перегретых паров).** В этом случае необходимо построить два цикла с минимальной работой: для конденсатора —  $I-II-III-IV$  и

охладителя перегретых паров —  $A-B-C-D$  с температурами отдачи теплоты соответственно  $T_{hot1}$  и  $T_{hot2}$  (см. рис. 2, б).

**2.1. Конденсатор.** Расчетные формулы:

$$s_{вх.кон} = s_3; \quad s_{вых.кон} = s_4;$$

$$q_{доб.кон} = (h_3 - h_4); \quad T_{доб.кон} = T_{hot1}.$$

Поскольку площади  $c-3-4-a-c$  и  $d-II-III-a-d$  равны, можно записать следующее уравнение:

$$h_3 - h_4 = T_{hot1}(s_{II} - s_{III}) = T_{hot1}(s_d - s_4); \quad (9)$$

$$s_d = \frac{h_3 - h_4}{T_{hot1}} + s_4. \quad (10)$$

Произведенная эксергия в конденсаторе

$$s_{произ.кон} = \sum m_{вых.кон} s_{вых.кон} - \sum m_{вх.кон} s_{вх.кон} +$$

$$+ \frac{q_{доб.кон}}{T_{hot1}} = m \left[ s_4 - s_3 + \frac{h_3 - h_4}{T_{hot1}} \right]. \quad (11)$$

Потери эксергии в конденсаторе

$$e_{Джон} = T_{o.c} s_{произ.кон} = T_{o.c} \left[ (s_4 - s_3) + \frac{h_3 - h_4}{T_{hot1}} \right] =$$

$$= T_{o.c}(s_4 - s_3 + s_d - s_4) = T_{o.c}(s_d - s_3). \quad (12)$$

**2.2. Охладитель перегретых паров.** Расчетные формулы:

$$s_{вх.о.п} = s_2; \quad s_{вых.о.п} = s_3;$$

$$q_{доп.о.п} = (h_2 - h_3); \quad T_{доб.о.п} = T_{hot2}; \quad T_{hot2} > T_{hot1}.$$

Поскольку площадь  $f-2-3-c-e$  равна площади  $g-B-C-d-g$ , можно записать:

$$h_2 - h_3 = T_{hot2}(s_B - s_C); \quad (13)$$

$$s_B = \frac{h_2 - h_3}{T_{hot2}} + s_C; \quad (14)$$

$$s_{\text{произ.о.п}} = \sum m_{\text{вых.о.п}} s_{\text{вых.о.п}} - \sum m_{\text{вх.о.п}} s_{\text{вх.о.п}} + \frac{q_{\text{доп.о.п}}}{T_{\text{доп.о.п}}} = m \left[ (s_3 - s_2) + \frac{h_2 - h_3}{T_{hot2}} \right]. \quad (15)$$

Потери эксергии в охладителе перегретых паров

$$e_{D_{o.п}} = T_{o.c} s_{\text{произ.о.п}} = T_{o.c} \left[ (s_3 - s_2) + \frac{h_2 - h_3}{T_{hot2}} \right] = T_{o.c} (s_3 - s_2 + s_B - s_C). \quad (16)$$

Сумма потерь в конденсаторе и охладителе перегретых паров

$$e_{D_{кон}} + e_{D_{o.п}} = T_{o.c} (s_d - s_3 + s_3 - s_2 + s_B - s_C) = T_{o.c} (s_B - s_2), \quad (17)$$

где

$$s_d = s_C; \quad s_B = s_g; \quad (18)$$

$$s_B = \frac{h_2 - h_3}{T_{hot2}} + s_d = \frac{h_2 - h_3}{T_{hot2}} + \frac{h_3 - h_4}{T_{hot1}} + s_4. \quad (19)$$

Поскольку  $s_B = s_g < s_f$ , установка двухступенчатого конденсатора позволяет уменьшить потери эксергии, в результате чего повышается эксергетический КПД конденсатора и ТНУ в целом.

### Выводы

1. Введение понятия эксергии значительно облегчает исследование влияния необратимости теплообмена на эффективность термодинамической системы (теплового насоса), что обуславливает широкое распространение ЭЦМ в последние годы.

2. Один из путей повышения эффективности ТНУ — использование охладителя перегретых паров рабочего тела, устанавливаемого отдельно от конденсатора. При этом внешняя необратимость, связанная с условиями взаимодействия системы с приемником энергии, уменьшается, что влечет за собой повышение эффективности ТНУ, т.е. введение охладителя паров приводит к уменьшению в нем разности температур потоков, в результате чего возрастает эксергетический КПД конденсатора.

3. Помимо систем горячего водоснабжения и отопления в жилищном секторе двухцелевой тепловой насос (конденсатор и охладитель перегретых паров) можно использовать в любых отраслях промышленности, где для технологических процессов требуется теплоноситель различных температурных уровней.

### Список литературы

1. Соколов Е. Я., Бродянский В. М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Мартынов А. В., Петраков Г. Н. Двухцелевой тепловой насос. — Промышленная энергетика, 1994, № 12.
3. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения / Под ред. В. М. Бродянского. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Бэр Г. Д. Техническая термодинамика: Пер. с нем. — М.: Мир, 1977.
5. Вопросы термодинамического анализа: Сб. переводов / Под ред. В. М. Бродянского. — М.: Мир, 1965.
6. Morosuk T., Nikulshin R., Morosuk L. Entropy cycle method for analysis of refrigeration machine and heat pump cycles. — Thermal science, 2006, vol. 10, № 1.
7. Морозюк Т. В. О корректном проведении эксергетического анализа. — Холодильная техника, 2006, № 2.
8. Холодильные машины: Учебник для студентов втузов специальности "Техника и физика низких температур" / А. В. Бараненко, Н. Н. Бухарин, В. И. Пекарев и др. Под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. — СПб.: Политехника, 1997.
9. Архаров А. М., Сычев В. В. Основы энтропийно-статистического анализа реальных энергетических потерь в низкотемпературных и высокотемпературных машинах и установках. — Холодильная техника, 2005, № 12.