

## Способы оценки энергоиспользования термодинамических систем. Термодинамика конечного времени

Д.т.н. Иванов О.П., аспирант Ленчук О.С.

К числу важных задач термодинамики относится оценка эффективности использования подводимой к термодинамическим системам энергии, а также оценка их предельных возможностей.

Наиболее известным и распространенным выражением для определения уровня энергоиспользования различных циклов, является отношение действительного производства энергии к максимально возможной.

$$\eta_{эн} = E^{\delta} / E_{макс} \cdot \quad (1)$$

Сопоставление реальных процессов с идеализированными аналогами по КПД, дает представление насколько высок уровень энергоиспользования в том или ином процессе и есть ли возможности для его совершенствования. В теплоэнергетике аналогом идеализированного процесса является цикл Карно, определяемый только температурами горячего и холодного источников теплоты.

$$\eta_{эн}^{отн} = \eta_{эн}^{реал} / \eta_{эн}^{ид} \cdot \quad (2)$$

Для учета качеств различных форм энергии, применяют метод анализа систем, основанный на понятии «эксэргия» - той доле энергии, которая потенциально может быть превращена в работу.

$$\eta_{экс}^{отн} = \eta_{экс}^{реал} / \eta_{экс}^{ид} \cdot \quad (3)$$

Эксэргетический анализ позволяет сказать, в каких элементах системы, на каких стадиях технологического процесса происходят наибольшие потери эксэргии, что указывает на необходимость совершенствования этих стадий.

Несмотря на то, что предельным случаем любого реального процесса (действительно необратимого) является соответствующий обратимый процесс, оценить степень совершенства теплообмена с использованием термодинамики обратимых процессов нельзя.

Процессы тепломассопереноса в реальных системах принципиально необратимы. Возникает задача об организации процесса теплообмена таким образом, чтобы минимизировать необратимость, т.е. обеспечить оптимальную организацию процесса теплообмена. Вопрос о степени термодинамического совершенства теплообмена при заданном коэффициенте теплотеноса, продолжительности процесса и количестве передаваемого тепла, ставится в термодинамике конечного времени и оценивается с помощью показателя термодинамического совершенства теплообменника:

$$\eta = \frac{\Delta s^*}{\Delta s}, \quad (4)$$

где  $\Delta s^*$  - минимальное производство энтропии в аппарате при необратимом теплообмене  $[Bm/K]$ ;  $\Delta s$  - производство энтропии в реальном аппарате  $[Bm/K]$ . Теплообмен считается термодинамически более совершенным, если при заданной средней интенсивности и коэффициенте теплопередачи, он сопровождается меньшим приростом энтропии (диссипацией энергии).

Пример: Рассмотрим пластинчатый противоточный теплообменник, имеющий коэффициент теплопередачи  $\kappa = 12 Bm/(m^2 K)$ . Горячий поток сухого воздуха с водяным эквивалентом  $W_2 = 72,96 Bm/K$  и температурой на входе в аппарат  $T_{z1} = 295,15 K$ , передает тепло холодному сухому потоку, который поступает в аппарат при постоянной температуре  $T_x = 270,95 K$ . Площадь теплопередающей поверхности аппарата варьируется  $F = (0,4 \div 30) m^2$  с шагом  $0,4 m^2$ . Требуется определить изменение значений термодинамического КПД ( $E$ ), показателя термодинамического совершенства теплообменника ( $\eta$ ), температур потоков на выходе из аппарата ( $T_{z2}, T_{x2}$ ) в идеальном необратимом процессе.

Порядок решения поставленной задачи:

- максимальное количество передаваемого тепла (тепловая нагрузка аппарата)

$$q^*(f) = W_2 [T_{z1} - T_{x1}]^* \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\kappa^* f}{W_2}\right) \right], Bm. \quad (5)$$

- Приращение тепловой нагрузки

$$\Delta q^* = q(f_{n+1}) - q(f_n), Bm. \quad (6)$$

- Действительное производство энтропии в аппарате

$$\Delta s(f) = \frac{q^*}{T_{x1}} - W_2^* \ln \frac{T_{z1}}{T_{z1} - \frac{q^*}{W_2}}, Bm / K. \quad (7)$$

- Минимальное производство энтропии в аппарате в необратимом процессе

$$\Delta s^*(f) = \frac{\left( W_2^* \ln \frac{T_{z1}}{T_{z1} - \frac{q^*}{W_2}} \right)^2}{\kappa^* f - \left( W_2^* \ln \frac{T_{z1}}{T_{z1} - \frac{q^*}{W_2}} \right)}, Bm / K. \quad (8)$$

- Показатель термодинамического совершенства теплообменника

$$\eta = \frac{\Delta s^*}{\Delta s} \quad (9)$$

- Термодинамический коэффициент полезного действия теплообменника

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{\kappa^* F}{W_2}\right). \quad (10)$$

- Конечные температуры потоков при оптимальном теплообмене горячего потока

$$T_{22}^*(f) = T_{21} - \frac{q^*}{W_2}, K. \quad (11)$$

холодного потока

$$T_{x2}^*(f) = \left[ T_{21} - \frac{q^*}{W_2} \right] * \left[ 1 - \frac{W_2}{\kappa^* f} * \ln \frac{T_{21}}{T_{21} - \frac{q^*}{W_2}} \right], K. \quad (12)$$

Результирующие зависимости полученных в ходе расчета результатов представлены на рисунках.

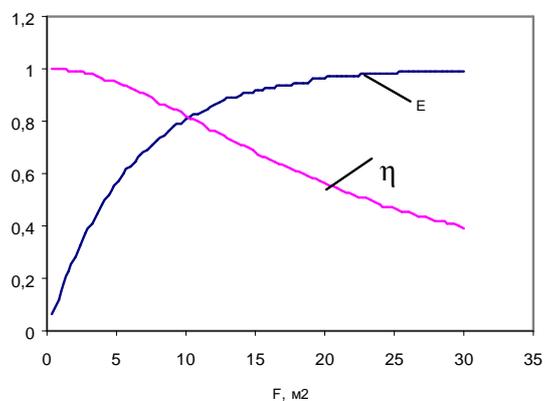


Рис.1 Характер изменения термодинамического КПД (E) и показателя термодинамического совершенства теплообменника ( $\eta$ )

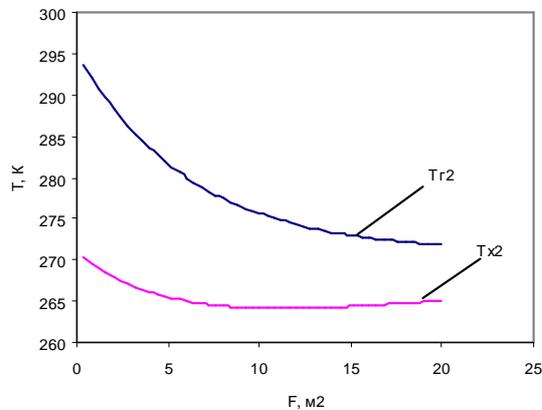


Рис.2 Характер изменения температур потоков, выходящих из теплообменника, при идеальном необратимом процессе.

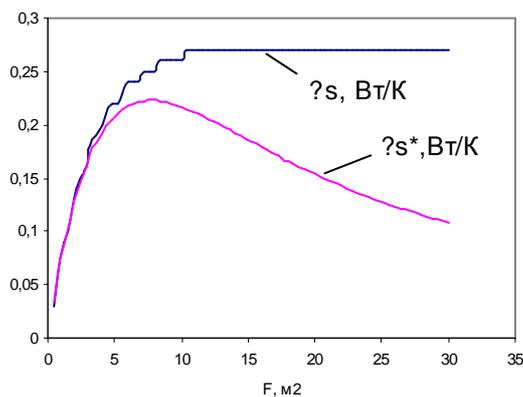


Рис. 3 Характер зависимости минимального ( $\Delta s^*$ , Вт/К) и реального ( $\Delta s$ , Вт/К) производства энтропии от площади теплообменной поверхности теплообменника ( $F$ , м<sup>2</sup>).

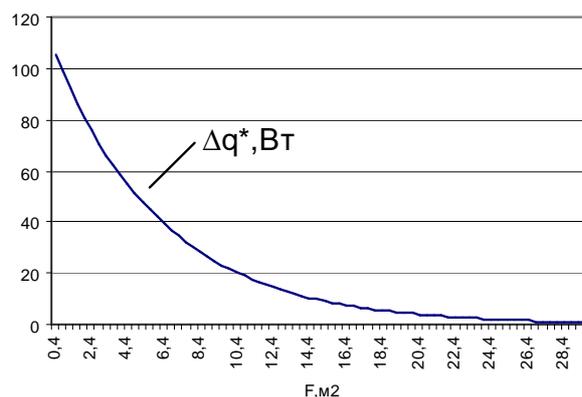


Рис. 4 Вид зависимости приращения тепловой нагрузки аппарата ( $\Delta q^*$ , Вт) от площади теплообменной поверхности аппарата.

Как видно из рис. 1, характер кривых  $E$  и  $\eta$  принципиально различен. Термодинамический КПД возрастает с увеличением площади теплопередающей поверхности, в то время как характер кривой показателя термодинамического совершенства теплообменника указывает на увеличение диссипации энергии и, соответственно, увеличение необратимости процесса в аппаратах с большей площадью теплопередающей поверхности. Как видно из рис. 4, нельзя бесконечно добиваться увеличения тепловой нагрузки аппарата только за счет увеличения площади теплопередающей поверхности, при сохранении постоянными остальных параметров. Начиная с некоторого своего значения,  $\Delta q^*$  становится пренебрежительно мало и практически не влияет на реальное производство энтропии в аппарате  $\Delta s$  (рис. 3).

## Список литературы

1. Степанов В.С., Степанова Т.Б. Эффективность использования энергии. – Новосибирск: Наука, 1994.
2. Иванов О.П. Теоретические основы кондиционирования и жизнеобеспечения. – Ленинград: Ленинградский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени технологический институт имени Ленсовета, 1987.
3. Цирлин А.М. Методы оптимизации в необратимой термодинамике и микроэкономике. – М.: Физматлит, 2003.
4. Линецкий С.Б., Цирлин А.М. Оценка термодинамического совершенства и оптимизация теплообменников//Теплоэнергетика. 1988. №10. С. 65 – 68.