

**КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**

*А. И. Степанова, кандидат технических наук
Институт технической теплофизики НАН Украины
e-mail: nmfialko@ukr.net.*

Аннотация. Предлагаются результаты классификации и анализа основных критериев оценки эффективности теплоутилизационных систем. Приводятся результаты исследования чувствительности некоторых критериев эффективности к изменению параметров теплоутилизационных систем, проведенные на основе предложенного коэффициента чувствительности.

Ключевые слова: *эффективность, оптимизация, теплоутилизационная система*

Перечень условных обозначений:

c_p – удельная изобарная
теплоемкость;

E – эксергетическая мощность;

G – массовый расход
теплоносителя;

T – температура;

T_0 – температура окружающей
среды;

p – давление;

R – газовая постоянная;

Δ – изменение величины;

μ – молекулярная масса;

Индексы верхние:

дг – дымовые газы;

возд – воздух.

Индексы нижние:

вх, вых – входной, выходной
параметр;

пот – потери;

ср – среднее значение величины;

эт – эталонный образец;

ex – эксергетический.

На существующем этапе развития народного хозяйства модернизация коммунальной теплоэнергетики Украины предполагает необходимость разработки и внедрения эффективных технологий, в том числе технологий утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок. Разработка указанных технологий возможна только на основе современных комплексных подходов к анализу эффективности и оптимальному проектированию теплоутилизационного оборудования.

Такие подходы с необходимостью включают разработку новых комплексных критериев оценки эффективности теплоутилизационных систем, которые должны обладать высокой чувствительностью к изменению определенных параметров системы и служить также целевыми функциями оптимизации. Это может быть достигнуто путем включения в критерии некоторых энергетических характеристик, отличающихся высокой чувствительностью к изменению режимных и конструктивных параметров теплоутилизационной системы. Использование одного критерия эффективности в качестве целевой функции оптимизации или применение многокритериальной оптимизации позволяет более глубоко изучить работу теплоутилизационной системы и оценить ее совершенство с различных сторон.

Цель работы – классификация и анализ критериев оценки эффективности теплоутилизационных систем на основе различных подходов к их построению, а также сравнительный анализ чувствительности некоторых критериев эффективности к изменению режимных и конструктивных параметров теплоутилизационных систем.

Материалы и методика исследований. В настоящее время эффективность систем утилизации теплоты оценивается целым рядом критериев, которые предполагают, главным образом, только один из подходов к их построению: термодинамический, теплотехнический, технологический, энергетический, экономический.

Термодинамический подход лежит в основе различных модификаций термодинамического КПД.

Основанные на теплотехническом подходе критерии эффективности включают такие параметры теплоутилизационных систем, как тепловая мощность Q , мощность на прокачку теплоносителей N , температурный напор ΔT , полезная $Q_{\text{пол}}$ и затрачиваемая $Q_{\text{зат}}$ тепловые мощности и др.:

$$k = Q/N; \quad k = Q/N \Delta T; \quad k = Q_{\text{пол}}/Q_{\text{зат}}. \quad (1)$$

Технологический подход положен в основу критериев, включающих массогабаритные показатели теплоутилизаторов – массу m и объем V :

$$m_0 = m/Q, \quad k = Q/V. \quad (2)$$

Эксергетический подход включает различные типы эксергетических КПД. Наиболее распространенные – эксергетический КПД, в котором используются суммарные эксергетические потоки на входе $E_{\text{ивх}}$ и выходе $E_{\text{ивых}}$ системы, а также разностный эксергетический КПД, использующий понятия возрастания получаемой эксергии $\Delta E_{\text{ин}}$ и уменьшения расходуемой эксергии $\Delta E_{\text{ип}}$:

$$\eta = \sum_{i=1}^n E_{\text{ивых}} / \sum_{i=1}^n E_{\text{ивх}}; \quad \eta = \sum_{i=1}^n \Delta E_{\text{ин}} / \sum_{i=1}^n \Delta E_{\text{ип}}; \quad (3)$$

Первый определяет степень термодинамического совершенства системы, но имеет существенный недостаток – он не отражает процесса с точки зрения его целевого назначения. Второй отражает степень реализации поставленной цели, однако не применим для процессов, в которых существует неоднозначность в трактовке полезных эффектов и затрат.

Широкое распространение в практике теплообмена для оценки эффективности теплотехнического оборудования получили критерии, основанные на сопоставлении различных параметров в рассматриваемой и эталонной установке: тепловой мощности Q , мощности на прокачку теплоносителей N , поверхности теплообмена F , числа Нусельта, коэффициента сопротивления ξ и др.:

$$k_Q = Q/Q_0; k_N = N/N_0; k_F = F/F_0; k_{Nu} = Nu/Nu_0; k_\xi = \xi/\xi_0; \\ F_{Re} = (Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0). \quad (4)$$

Применение критериев (1-4) для оценки эффективности теплоутилизационного оборудования различного типа предполагает наличие многочисленных дополнительных условий, обеспечивающих корректность сравнительного анализа эффективности различных теплоутилизационных систем.

Достаточное распространение получил эксергоэкономический подход, позволяющий при оценке эффективности технологической системы основываться на экономических и эксергетических показателях. В качестве эксергоэкономических критериев оценки эффективности энергетической установки обычно выбирают комбинации стоимостных показателей эксергии и общих стоимостных показателей капитальных инвестиций, связанных с разработкой, сооружением и эксплуатацией энергоустановки.

Результаты исследований. В работе [1] предложен комплексный подход, позволяющий при анализе эффективности теплоутилизационного оборудования учитывать совместно несколько различных аспектов: а именно, термодинамический, теплотехнический и технологический. На основе указанного подхода предложены тепло-эксергетический и эксерго-технологический критерии эффективности:

$$\varepsilon = E_{\text{пот}}/Q, \quad k_{ex}^T = E_{\text{пот}}m_0/Q. \quad (5)$$

Кроме этих критериев для оценки эффективности и оптимизации газоздушных противоточных теплоутилизаторов предложено следующее выражение для эксергетического критерия эффективности:

$$k_{ex} = \eta_{ex} / \eta_{ex}^{\text{ид}}. \quad (6)$$

При построении этого критерия используются разностные эксергетические КПД исследуемого теплообменника η_{ex} и теплообменника с высокой степенью идеальности $\eta_{ex}^{\text{ид}}$. Используемые при этом аналитические зависимости получены с учетом уравнения состояния идеального газа,

поскольку в области изменения рабочих параметров рассматриваемых газоздушных противоточных теплообменников дымовые газы и воздух с достаточной степенью точности можно считать идеальным газом. Выражение для разностного эксергетического КПД имеет следующий вид:

$$\eta_{ex} = \frac{G^{ВОЗ} \left[c_{рсп}^{ВОЗ} (T_{ВЫХ}^{ВОЗ} - T_{ВХ}^{ВОЗ}) - T_0 \left(c_{рсп}^{ВОЗ} \ln \frac{T_{ВЫХ}^{ВОЗ}}{T_{ВХ}^{ВОЗ}} - \frac{R}{\mu^{ВОЗ}} \ln \left(\frac{\Delta p^{ВОЗ}}{p_{ВХ}^{ВОЗ}} + 1 \right) \right) \right]}{G^{Д.Г} \left[c_{рсп}^{Д.Г} (T_{ВХ}^{Д.Г} - T_{ВЫХ}^{Д.Г}) - T_0 \left(c_{рсп}^{Д.Г} \ln \frac{T_{ВХ}^{Д.Г}}{T_{ВЫХ}^{Д.Г}} - \frac{R}{\mu^{Д.Г}} \ln \left(\frac{\Delta p^{Д.Г}}{p_{ВЫХ}^{Д.Г}} + 1 \right) \right) \right]} \quad (7)$$

При получении выражения для эксергетического критерия k_{ex} используется ряд допущений. Для противоточного теплообменника с высокой степенью идеальности можно полагать, что потери на трение $\Delta p^{Д.Г, ВОЗ}$ бесконечно малы, а выходящая температура греющего теплоносителя приближается к входной температуре воспринимающего и наоборот $T_{ВЫХ}^{Д.Г} = T_{ВХ}^{ВОЗ}$, $T_{ВХ}^{Д.Г} = T_{ВЫХ}^{ВОЗ}$. Тогда, опуская промежуточные выкладки, получим следующее выражение для эксергетического критерия эффективности:

$$k_{ex} = \frac{T_{ВЫХ}^{ВОЗ} - T_{ВХ}^{ВОЗ} - T_0 \left(\ln \frac{T_{ВЫХ}^{ВОЗ}}{T_{ВХ}^{ВОЗ}} - \frac{R}{\mu^{ВОЗ} c_{рсп}^{ВОЗ}} \ln \frac{p_{ВЫХ}^{ВОЗ}}{p_{ВХ}^{ВОЗ}} \right)}{T_{ВХ}^{Д.Г} - T_{ВЫХ}^{Д.Г} - T_0 \left(\ln \frac{T_{ВХ}^{Д.Г}}{T_{ВЫХ}^{Д.Г}} - \frac{R}{\mu^{Д.Г} c_{рсп}^{Д.Г}} \ln \frac{p_{ВХ}^{Д.Г}}{p_{ВЫХ}^{Д.Г}} \right)}. \quad (8)$$

При достаточной близости двух оценочных характеристик – разностного эксергетического КПД (7) и предложенного эксергетического критерия (8), полученное выражение для эксергетического критерия представляется более наглядным и простым в использовании, а применение указанного критерия – целесообразным для оценки эффективности соответствующего теплоутилизационного оборудования. Указанные критерии используются для оценки эффективности теплоутилизационных систем энергетических установок, а также в качестве целевых функций оптимизации при решении

оптимизационных задач с целью оптимального проектирования теплоутилизационного оборудования.

На примерах теплоутилизационных систем котельных агрегатов и стекловаренных печей, включающих водогрейные и воздухогрейные теплоутилизаторы, проведен сравнительный анализ чувствительности различных критериев эффективности к изменению параметров теплоутилизационных систем. Было выбрано несколько критериев оценки эффективности:

- эксерго-технологический критерий $k_{ex}^T = E_{nom} m_0 / Q$;
- тепло-эксергетический критерий $\varepsilon = E_{nom} / Q$;
- технологический критерий $m_0 = m / Q$;
- эксергетический критерий $k_{ex} = \eta_{ex} / \eta_{ex}^{ud}$
- энергетический критерий Кирпичова $k = Q / N$;

Введем понятие коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}$, с помощью которого будем определять чувствительность критериев эффективности к изменению определенных параметров теплоутилизационной системы:

$$k_{\text{ч}} = \delta_{\text{кр}} / \delta_{\text{пар}}, \quad (9)$$

где $\delta_{\text{кр}}$, $\delta_{\text{пар}}$ – относительные изменения критерия эффективности и соответствующего параметра.

В качестве независимых параметров были выбраны некоторые режимные параметры теплоутилизационной системы: отношение чисел Рейнольдса дымовых газов и воздуха, отношение начального и конечного влагосодержания влагосодержание дымовых газов, температура дымовых газов и воздуха на входе в теплоутилизатор, коэффициент турбулизации и др., а также геометрические параметры поверхности теплообмена теплоутилизаторов различного типа. На рисунке в качестве примера приведены зависимости эксерго-технологического критерия эффективности k_{ex}^T от режимных параметров воздухоподогревателя, предназначенного для

подогрева дутьевого воздуха котлоагрегата. С помощью аналогичных зависимостей исследуемых критериев эффективности от режимных и конструктивных параметров теплоутилизаторов, входящих в различные теплоутилизационные системы, определены соответствующие коэффициенты чувствительности $k_{\text{ч}}$ (таблица).

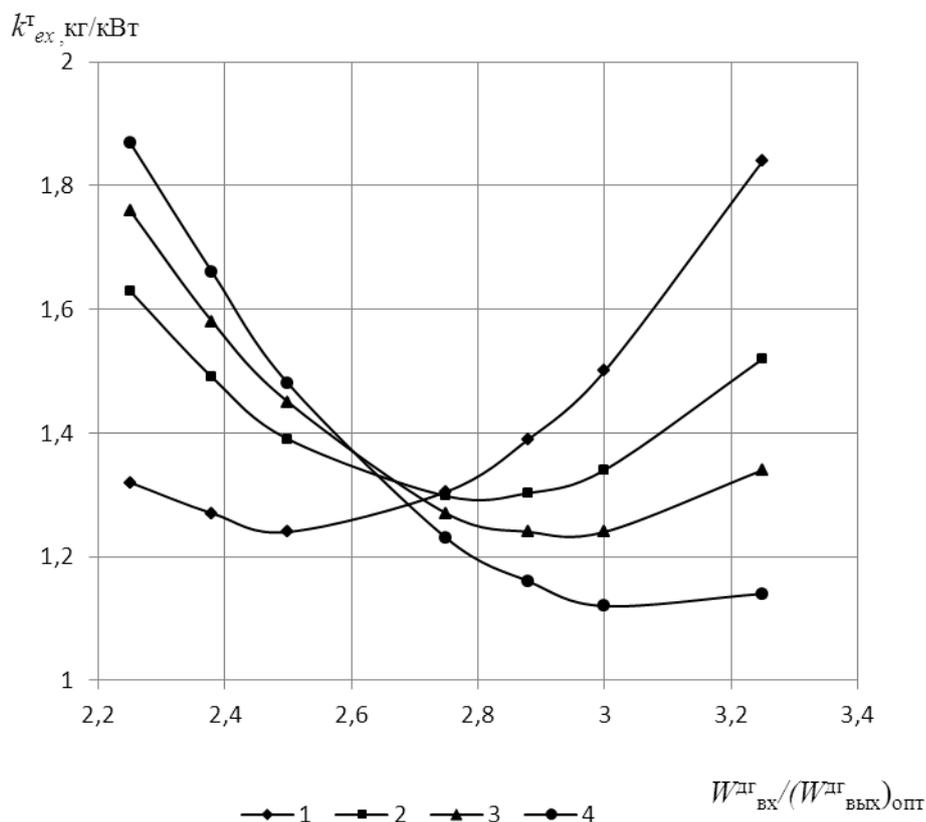


Рис. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от отношения влагосодержаний дымовых газов:

$$(W_{\text{ВЫХ}}^{\text{дг}})_{\text{опт}} = 0,04 \text{ кг/кг с.г.}; 1 - \text{Re}^{\text{дг}} / \text{Re}^{\text{возд}} = 1,20; 2 - 1,00; 3 - 0,90; 4 - 0,80.$$

Как видно из таблицы, наиболее чувствительными к изменению режимных параметров теплоутилизационной системы являются критерий Киричова k и эксерго-технологический критерий эффективности k_{ex}^T . Наиболее чувствительными к изменению геометрических параметров

поверхности теплообмена являются критерий Киричева k и тепло-эксергетический критерий эффективности ϵ .

Чувствительность критериев эффективности к изменению параметров теплоутилизационной системы

Критерий эффективности	Коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$	
	Режимные параметры	Геометрические параметры
k_{ex}^T , кг/кВт	1,0...2,6	0,5...0,8
ϵ	0,5...1,6	1,0...1,8
m_0 , кг/кВт	0,1...0,3	0,2...0,4
k_{ex}	1,0...1,5	0,5...0,8
k	1,5...2,5	0,5...1,5

Выводы

1. Проведена классификация и анализ основных критериев оценки эффективности теплоутилизационных систем на основе подходов к их построению: термодинамического, теплотехнического, технологического, эксергетического, экономического, а также комплексных подходов: эксерго-технологического и тепло-эксергетического.
2. Для оценки эффективности и оптимизации определенных теплоутилизаторов в системах утилизации теплоты, а именно газоздушных противоточных теплоутилизаторов предложен достаточно наглядный и простой в использовании эксергетический критерий эффективности.
3. Предложен коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}}$, с помощью которого проведен сравнительный анализ чувствительности некоторых критериев эффективности к изменению режимных и конструкционных параметров теплоутилизационных систем.

Список литературы

1. Фиалко Н.М. Оптимизация конструктивных параметров конденсационного тепло-утилизатора котельной установки / Ю. В. Шеренковский, А. И. Степанова, Р. А. Навродская, П. К. Голубинский, М. А. Новаковский // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 3. – С. 48 – 54.

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

А. І. Степанова

Анотація. *Пропонуються результати класифікації та аналізу основних критеріїв оцінки ефективності теплоутилізаційних систем. Наводяться результати дослідження чутливості деяких критеріїв ефективності до зміни параметрів теплоутилізаційних систем, проведені на основі запропонованого коефіцієнта чутливості.*

Ключові слова: *ефективність, оптимізація, теплоутилізаційна система*

EVALUATION CRITERIA OF EFFICIENCY OF POWER PLANTS HEAT RECOVERY

A. Stepanova

Annotation. *Available results of the classification and analysis of the main criteria for evaluating the efficiency of heat recovery systems. The results of sensitivity analysis of certain performance criteria to carried out on the basis of the proposed rate change sensitivity heat recovery systems parameters.*

Key words: *efficiency, optimization, thermoutilyzing boiler system*