

УДК 621.036.7

КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Фиалко Н. М., член-кор. НАН Украины, **Степанова А.И.**, канд. техн. наук,
Шевчук С. И., канд. техн. наук, **Сбродова Г.А.**, канд. физ.-мат. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.04>

Викладено основні етапи розроблених комплексних методик оцінки ефективності та оптимізації теплоутилізаційних систем, заснованих на принципах ексергетичного аналізу, статистичних методів планування експерименту, структурно-варіантних методів, методів багаторівневої оптимізації, теорії лінійних систем і термодинаміки незворотних процесів. Для прикладу наведено малюнки і формули, що ілюструють деякі з етапів розроблених методик.

Изложены основные этапы разработанных комплексных методик оценки эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем, основанных на принципах эксергетического анализа, статистических методов планирования эксперимента, структурно-вариантных методов, методов многоуровневой оптимизации, теории линейных систем и термодинамики необратимых процессов. В качестве примеров приведены рисунки и формулы, иллюстрирующие некоторые из этапов разработанных методик.

The main stages of the development of complex methods for assessing the efficiency and optimization of heat recovery systems based on the principles of exergic analysis, statistical methods for planning the experiment, structural-variant methods, methods of multilevel optimization, the theory of linear systems and the thermodynamics of irreversible processes are outlined. Examples and illustrations illustrate some of the stages in the development of complex methods.

Библ. 14, рис. 5.

Ключевые слова: теплоутилизационные системы, комплексные методики, эффективность, оптимизация.

c_p – изобарная теплоемкость, кДж/кг·К;

\dot{E} – эксергетическая мощность, кВт;

F – площадь боковой поверхности, м²;

f – площадь поперечного сечения, м²;

G – массовый расход теплоносителя, кг/с;

i – удельная энтальпия, кДж/кг;

m – масса, кг;

N – мощность, кВт;

p – давление, кПа;

p_s – давление насыщенного водяного пара, кПа;

Q – тепловая мощность, кВт;

s – удельная энтропия, кДж/кг;

T – температура, К;

$T_{ст1}$ ($T_{ст2}$) – температура стенки со стороны дымовых газов (воздуха), К;

t – время, с;

W – влагосодержание;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке, кВт/м²·К;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, кВт/м²·К;

δ – толщина стенки, м;

λ – коэффициент теплопроводности, кВт/м·К;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления;

ρ – плотность, кг/м³.

Индексы верхние:

дг – дымовые газы;

вод – вода;

внут – внутренний.

Индексы нижние:

пот – потери;

ст – стенка;

вх, вых – вход, выход.

Актуальность. В настоящее время Украина обладает необходимым потенциалом для реализации эффективных энергосберегающих технологий утилизации теплоты, в связи с чем проблема их разработки и внедрения является актуальной для энергетики страны. Решение данной проблемы связано с необходимостью системных исследований эффективности и оптимизации теплоутилизационных установок с позиций современных методических подходов.

Анализ последних исследований и публикаций. Современные подходы к анализу эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем включают мето-

ды эксергетического анализа, статистические методы планирования эксперимента, методы теории линейных систем, термодинамики необратимых процессов, структурные, структурно-вариантные методы, методы многоуровневой оптимизации и др. Для анализа эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем необходима разработка комплексных методик, основанных на том или ином сочетании указанных методов, а также обоснованный выбор методики для каждого конкретного случая. Обоснованный выбор методики повышает результативность оптимизации, так как позволяет при разработке конструкции теплоутилизационной си-

стемы использовать параметры, максимально приближенные к оптимальным, что, в свою очередь, увеличивает эффективность системы [1-14].

Цель работы – повышение эффективности систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок на основе разработки и применения комплексных методик анализа эффективности и оптимизации.

Материалы и методы исследования. Для анализа эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем и их отдельных элементов разработаны и использованы методики, основанные на методах эксергетического анализа, статистических методах планирования эксперимента, методах теории линейных систем, термодинамики необратимых процессов, структурно-вариантных методах, методах многоуровневой оптимизации.

Результаты исследований. Создание новых комплексных методик оценки эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем включает в качестве необходимого общего для всех методик этапа разработку новых критериев эффективности. Предложенные тепло-эксергетический $\varepsilon = E_{\text{пот}}/Q$ и эксерго-технологический $k_{\text{ex}}^T = E_{\text{пот}} \cdot m/Q^2$ критерии эффективности обладают высокой чувствительностью к изменению режимных и конструктивных параметров теплоутилизационных систем за счет включения в них эксергетической характеристики $E_{\text{пот}}$. Указанные критерии одновременно служат целевыми функциями оптимизации.

Далее изложены основные этапы шести разработанных комплексных методик и в качестве примеров приведены рисунки и формулы, иллюстрирующие некоторые из этапов.

I. Для несложных теплоутилизационных систем или их отдельных элементов методика оценки эффективности и оптимизации позволяет определить функциональные зависимости выбранных критериев эффективности от основных параметров системы. Если такие зависимости установлены, оптимизация проводится с помощью известных математических методов.

Основные этапы методики определения указанных функциональных зависимостей состоят в следующем:

- с помощью балансовых методов эксергетического анализа составить систему эксергетических, тепловых и материальных балансовых уравнений, дополненную соответствующими гидродинамическими уравнениями и уравнениями теплопередачи – (1);
- из системы балансовых уравнений определить необходимые эксергетические характеристики, входящие в разработанные критерии эффективности и рассчитать соответствующие критерии;
- используя статистические методы планирования эксперимента, получить функциональные зависимости критериев эффективности от необходимых параметров в виде полинома – (2), рис.1;

- при наличии указанных функциональных зависимостей рассмотреть общую задачу оптимизации в виде:

$$\vec{K}^{\text{опт}}(\vec{x}_k, \vec{x}_i, \vec{x}_r = f(\vec{x}_k), \vec{x}_p = f(\vec{x}_i)) \rightarrow \min(\max)\vec{K}(\vec{x}_k, \vec{x}_i), \\ \vec{x}_k \in X, 0 \leq |X| \leq N_x \angle \infty; \vec{x}_i \in Y, 0 \leq |Y| \leq N_y \angle \infty,$$

K – вектор целевых функций; \vec{x}_k, \vec{x}_i – векторы варьируемых конструктивных и режимных параметров; $\vec{x}_r = f(\vec{x}_k), \vec{x}_p = f(\vec{x}_i)$ – векторы функций конструктивных и режимных варьируемых параметров; X, Y – области существования ограничений; N_x, N_y – границы области существования ограничений.

Система эксергетических, тепловых и материальных балансовых уравнений для водоподогревателя, входящего в теплоутилизационную систему, предназначенную для нагрева обратной сетевой воды, имеет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^m N_i + E_{\text{вых}}^{\text{дг}} + E_{\text{вых}}^{\text{вод}} - E_{\text{вх}}^{\text{дг}} + E_{\text{вх}}^{\text{вод}} = 0;$$

$$G^{\text{дг}} i^{\text{дг}} - G^{\text{вод}} i^{\text{вод}} = 0;$$

$$\sum_{i=1}^n G_{i\text{вх}} - \sum_{i=1}^n G_{i\text{вых}} = \text{const},$$

$$E_{\text{вх}}^{\text{дг}} - E_{\text{вых}}^{\text{дг}} = G^{\text{дг}} \left[c_{\text{рсп}}^{\text{дг}} (T_{\text{вх}}^{\text{дг}} - T_{\text{вых}}^{\text{дг}}) - \right. \\ \left. - T_0 \left(c_{\text{рсп}}^{\text{дг}} \ln \frac{T_{\text{вх}}^{\text{дг}}}{T_{\text{вых}}^{\text{дг}}} - \frac{R}{\mu^{\text{дг}}} \ln \frac{p_{\text{вх}}^{\text{дг}} - \varphi_{\text{вх}} p_s(T_{\text{вх}})}{p_{\text{вых}}^{\text{дг}} - \varphi_{\text{вых}} p_s(T_{\text{вых}})} \right) \right] + \\ + G^{\text{дг}} W_{\text{вх}} \left[(i_{p_{\text{вх}}} - i_{p_0}) - T_0 (s_{p_{\text{вх}}} - s_{p_0}) \right] - \\ - G^{\text{дг}} W_{\text{вых}} \left[(i_{p_{\text{вых}}} - i_{p_0}) - T_0 (s_{p_{\text{вых}}} - s_{p_0}) \right]; \\ E_{\text{вых}}^{\text{вод}} - E_{\text{вх}}^{\text{вод}} = G^{\text{вод}} \left[(i_{\text{вых}}^{\text{вод}} - i_{\text{вх}}^{\text{вод}}) - T_0 (s_{\text{вых}}^{\text{вод}} - s_{\text{вх}}^{\text{вод}}) \right]. \quad (1)$$

Функциональная зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от режимных параметров водоподогревателя:

$$k_{\text{ex}}^T = 3,52 - 44,81 W_{\text{вх}}^{\text{дг}} + 179,32 (W_{\text{вх}}^{\text{дг}})^2 + 1,79 W_{\text{вых}}^{\text{дг}} - \\ - 145,01 W_{\text{вх}}^{\text{дг}} W_{\text{вых}}^{\text{дг}} + 205,73 (W_{\text{вх}}^{\text{дг}})^2 - \\ - 0,90 \text{Re}^{\text{дг}} / \text{Re}^{\text{вод}} + 5,85 W_{\text{вх}}^{\text{дг}} \text{Re}^{\text{дг}} / \text{Re}^{\text{вод}} - 1,22 W_{\text{вх}}^{\text{дг}} \text{Re}^{\text{дг}} / \text{Re}^{\text{вод}} + \\ + 0,08 (\text{Re}^{\text{дг}} / \text{Re}^{\text{вод}})^2. \quad (2)$$

Для сложных теплоутилизационных систем, включающих большое количество элементов, при построении математических моделей, необходимых для их оп-

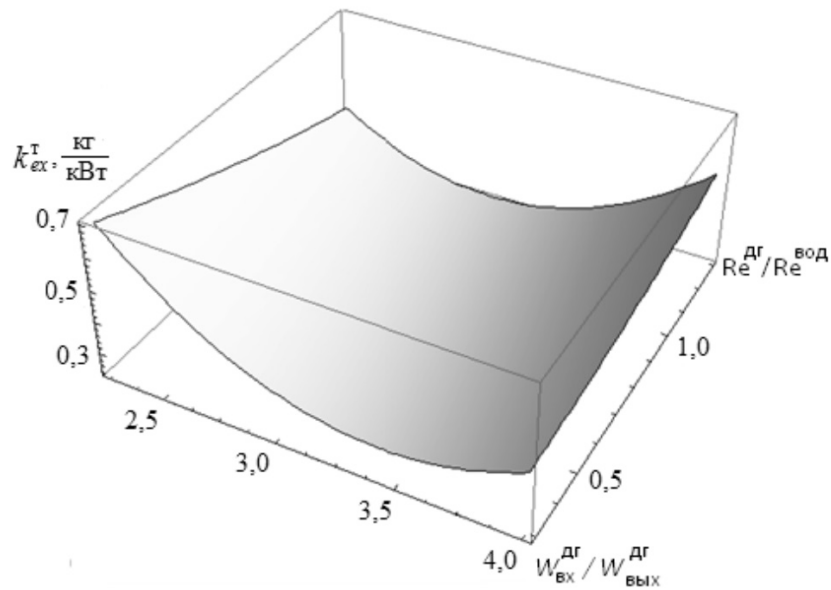


Рис. 1. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от отношения начального и конечного влагосодержания дымовых газов и отношения чисел Рейнольдса теплоносителей для водоподогревателя.

тимизации, не представляется возможным установить общие аналитические зависимости целевых функций оптимизации от параметров системы. В этих случаях целесообразно разработать для таких систем комплексные методики, построенные на основных принципах эксергетических, структурно-вариантных методов, методов многоуровневой оптимизации, теории линейных систем, термодинамики необратимых процессов в том или ином их сочетании.

II. Методика, основанная на принципах эксергетического и структурно-вариантного метода, позволяет распознать в теплоутилизационной системе элементы, изменение потерь эксергетической мощности в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности установки в целом, и оптимизировать эти элементы. Основные этапы методики следующие:

- разработать структурную схему установки, состоящую из ряда дискретных взаимосвязанных потоками эксергии элементов простой структуры – рис. 2;
- провести тепловые и эксергетические расчеты для распознавания элементов, изменение потерь эксергетической мощности в которых наиболее существенно влияет на изменение эффективности установки в целом – выделенные элементы на рис. 2;
- оптимизировать выделенные элементы с помощью определенных методов, например, балансовых методов эксергетического анализа и статистических методов планирования эксперимента;
- ввести оптимизированные элементы в общие схемы установок;

• использовать на следующих этапах оптимизации полученные значения оптимальных параметров элементов в качестве начальных условий.

III. Методика, основанная на принципах многоуровневой оптимизации, позволяет свести сложную многокритериальную и многопараметрическую оптимизационную задачу к более простым локальным взаимосогласованным оптимизационным задачам каждого уровня. Основные этапы методики следующие:

- разделить теплоутилизационную систему на несколько уровней оптимизации;
- разработать блок-схему и схему рекурсивного обхода уровней оптимизации, которая позволяет осуществлять постоянный информационный обмен между уровнями оптимизации – рис. 3;
- при построении математической модели данного уровня использовать в качестве переменных параметров варьируемые параметры объекта данного уровня, а в качестве постоянных – оптимальные параметры, которые являются результатами решения локальных оптимизационных задач других уровней;
- для построенных таким образом математических моделей на каждом уровне оптимизации решить соответствующую оптимизационную задачу и определить оптимальные значения параметров;
- уточнять получаемые оптимальные параметры с помощью дополнительных итераций.

IV. Методика, основанная на принципах теории линейных систем, а именно, на принципах метода *RP*-представления термодинамических балансов в мат-

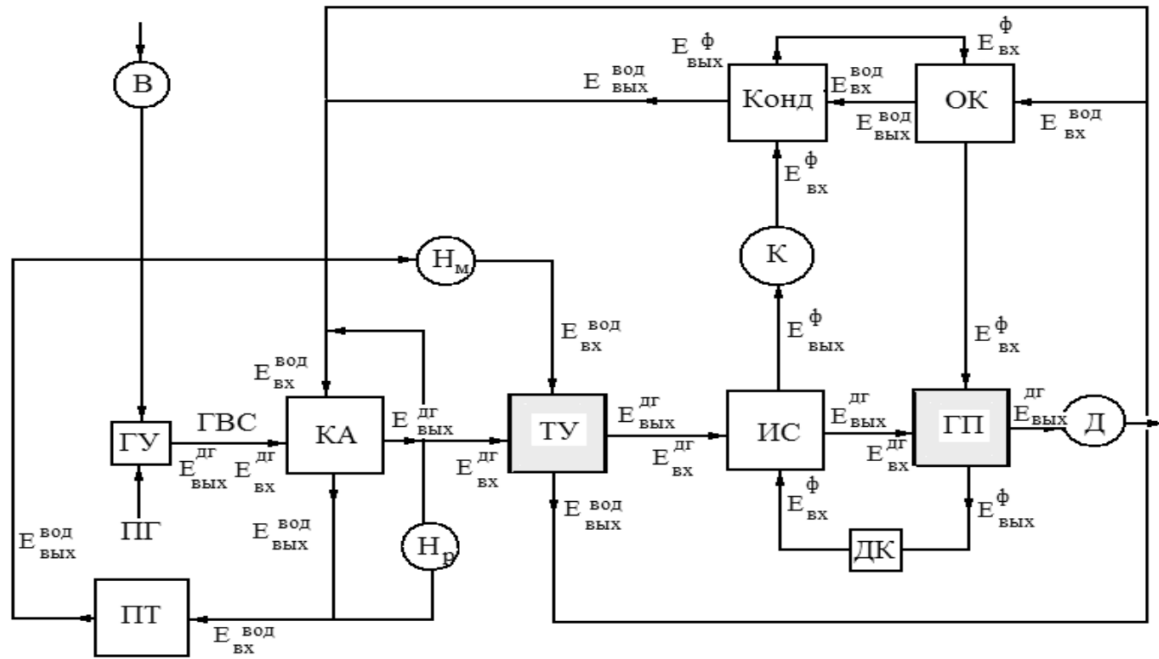


Рис. 2. Схема энергетических потоков установки для нагрева обратной теплотрассовой воды: ГУ – горелочное устройство; КА – котлоагрегат; ТУ – теплоутилизатор; ИС – испаритель; Конд – конденсатор; ОК – водогрейный охладитель конденсата рабочего вещества теплового насоса; ГП – газоподогреватель; ДК – дроссельный клапан; ПТ – потребитель теплоты; В – вентилятор; НМ, НР – насосы; Д – дымосос.



Рис. 3. Блок-схема многоуровневой оптимизации теплоутилизационной системы для подогрева обратной воды котельных (пунктирной линией обозначена схему рекурсивного обхода уровней оптимизации).

ричной форме, позволяет рассчитать потери эксергетической мощности в каждом элементе установки и определить относительный вклад каждого элемента в суммарную необратимость процессов в установке. Этапы методики следующие:

- разработать структурную схему установки, состоящую из ряда дискретных взаимосвязанных потоками эксергии элементов простой структуры – см. рис. 2;
- записать балансы массы, энергии и эксергии установки в матричной форме – (4);
- установить типы термодинамических потоков и представить все термодинамические балансы и термодинамические потоки исследуемой установки в системе источник-продукт;
- построить соответствующие матрицы, с помощью которых рассчитать степень необратимости процессов в установке – (5);
- провести сравнительный анализ потерь эксергетической мощности в различных элементах установки и определить относительный вклад каждого элемента в суммарную необратимость процессов – рис. 4.

Балансы массы, энергии и эксергии установки в матричной форме:

$$A_M M = 0,$$

$$A W = 0$$

$$A E = E_{\text{пот}}. \quad (4)$$

Здесь A_M – матрица входящих масс; M – столбец (вектор), содержащий потоки массы; A – полная входная матрица; W – столбец, содержащий потоки энергии; E – столбец, который содержит эксергию потоков массы, тепла и работы; $E_{\text{пот}}$ – искомый столбец (вектор), элементы которого $E_{\text{пот}i}$ характеризуют потерю эксергии в i -том элементе исследуемой установки.

Полная входная матрица A для установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему для подогрева воды и дутьевого воздуха, имеет следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Разработанная методика использована для анализа работы установки при различных режимах работы котла.

V. Методика расчета потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи на основе использования комплексного подхода, сочетающего эксергетические методы с методами термодинамики необратимых процессов, позволяет рассчитать общие потери эксергетической мощности в установке и установить долю потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи в общих потерях. Основные этапы методики следующие:

- разработать математическую модель исследуемых процессов, которая включает уравнение эксергии, уравнение баланса эксергии и энтропии, уравнение неразрывности трехфазной термодинамической системы при изменении концентрации одной из фаз, уравнения движения фаз, уравнение энергий, уравнения баланса энталпий, уравнения Гиббса и уравнение теплопроводности при граничных условиях третьего рода;
- получить локальное дифференциальное уравнение баланса эксергии, которое может быть использовано для расчета эксергетических потерь и решения оптимизационных задач в теплоутилизационных системах;
- решить совместно локальное дифференциальное уравнение баланса эксергии и уравнение теплопроводности и получить формулы для расчета потерь эксергетической мощности в процессах теплопередачи – (6);
- рассчитать общие потери эксергетической мощности и установить долю потерь эксергетической мощности в процессах теплопроводности в общих потерях – рис.5.

$$E_{\text{пот}} = \frac{T_0 \lambda F}{\delta} \left[\frac{2K - L}{-G(K - L + R)} - \frac{L}{GR} - \frac{2K}{G\sqrt{G}} \ln \frac{(2K - L - \sqrt{G})(-L + \sqrt{G})}{(2K - L + \sqrt{G})(-L - \sqrt{G})} \right].$$

$$K = A/B; L = PK + N; R = M + PN;$$

$$P = (D + A)/A; M = T_0 B/A(\vartheta_1 - T_0);$$

$$N = (C + A)/B; G = L^2 - 4KR; A = Bi_1 Bi_2;$$

$$B = Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 Bi_2; C = Bi_1 + Bi_2; D = Bi_1. \quad (6)$$

VI. Методика расчета потерь эксергетической мощности в теплоутилизационных системах, сочетающая эксергетические методы с методами, построенными на расчете диссипаторов эксергии, позволяет разделить потери эксергетической мощности по причинам и об-

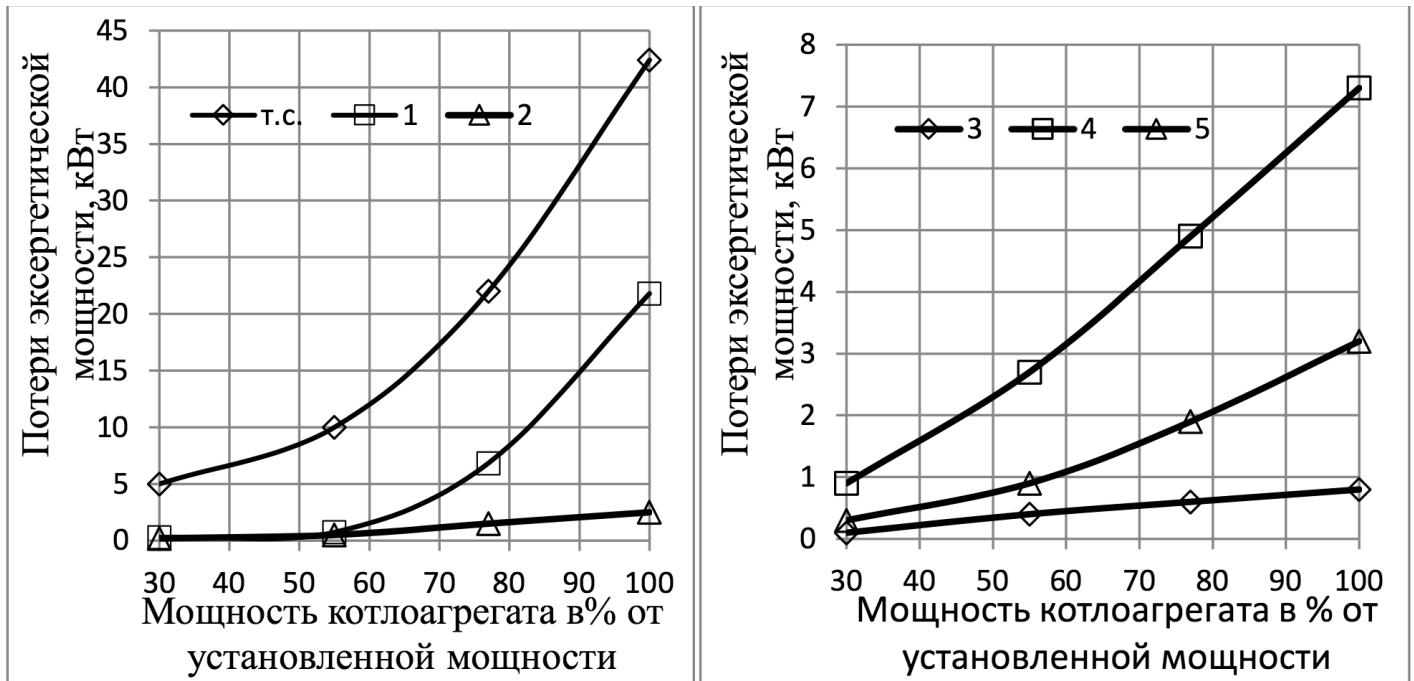


Рис. 4. Потери эксергетической мощности в зависимости от мощности котла, т.с. – тепло-утилизационная система: 1,2 – водогрейный и воздухогрейный теплоутилизаторы; 3 – газоподогреватель; 4 – дымосос; 5 – вентилятор.

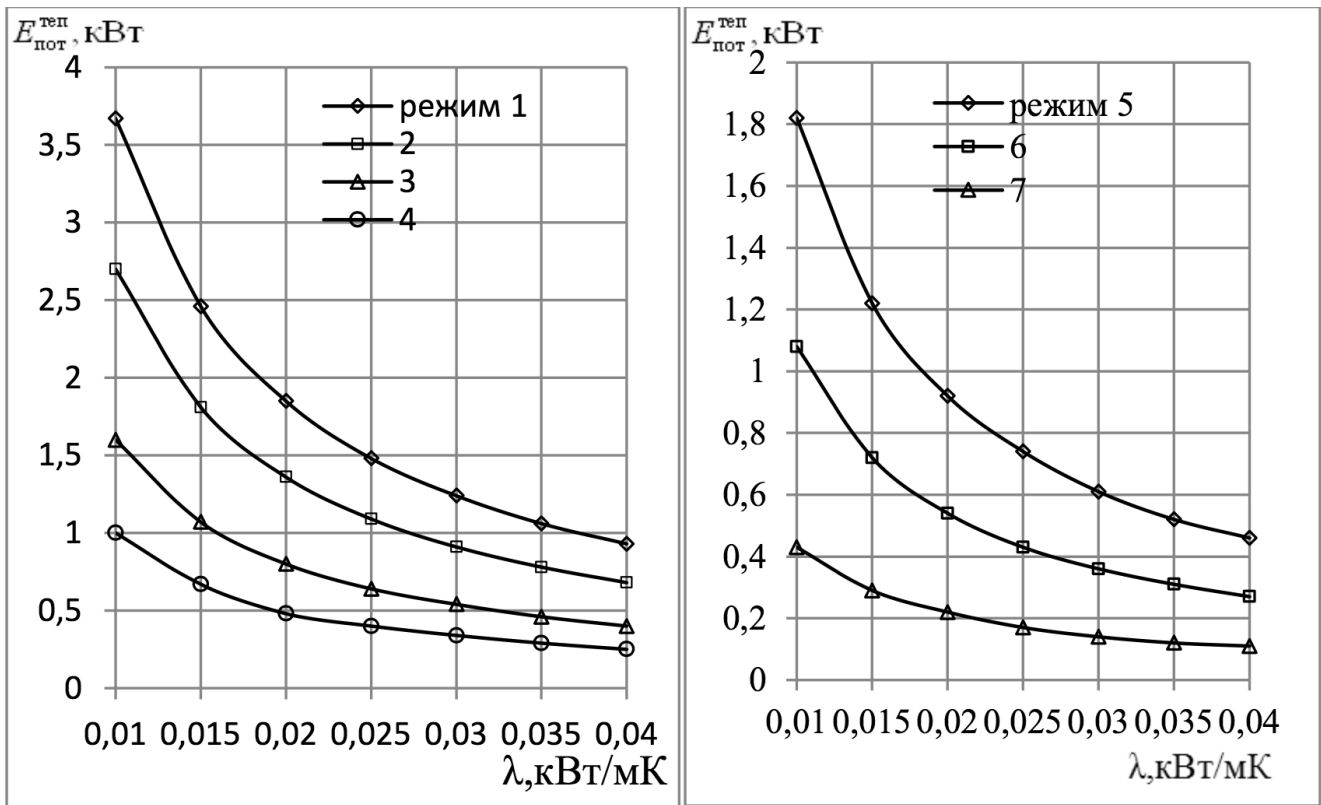


Рис. 5. Зависимость потерь эксергетической мощности в процессах теплопроводности от коэффициента теплопроводности при различных режимах работы котла.

ластям их локализации и выявить условия, при которых эти потери будут минимальными. Основные этапы методики следующие:

- разработать математическую модель исследуемых процессов, которая включает уравнение эксергии, уравнения баланса эксергии и энтропии, уравнение неразрывности, уравнения движения фаз, уравнение энергий, уравнения баланса энтальпий и уравнения Гиббса:

- получить локальные дифференциальные уравнения баланса энтропии и эксергии, которые могут быть использованы для расчета эксергетических потерь и решения оптимизационных задач в теплоутилизационных системах;

- получить формулы для расчета диссипаторов эксергии:

- диссипаторов, характеризующих потери эксергетической мощности вследствие неравновесного теплообмена между теплоносителями;

- диссипаторов, связанных с необратимыми потерями эксергетической мощности теплоносителей вследствие их вязкости (гидродинамическими потерями) – (7);

- рассчитать общие потери эксергетической мощности и установить долю гидродинамических потерь и потерь эксергетической мощности вследствие неравновесного теплообмена в общих потерях.

$$R_{\alpha 1} = \frac{T_0 Q^2}{\alpha_1 FT_{др} T_{ст1}}, R_{\lambda} = \frac{T_0 Q^2 \delta_{ст}}{\lambda_{ст} FT_{ст1} T_{ст2}},$$

$$R_{\alpha 2} = \frac{T_0 Q^2}{\alpha_2 FT_{воз} T_{ст2}},$$

$$R_{G1} = \frac{(G^{др})^3 \xi^{др} T_0}{2T^{др} (\rho^{др})^2 (f^{др})^2},$$

$$R_{G2} = \frac{(G^{воз})^3 \xi^{воз} T_0}{2T^{воз} (\rho^{воз})^2 (f^{воз})^2}. \quad (7)$$

- Полученные формулы для диссипаторов эксергии, связанных с потерями вследствие неравновесного теплообмена между теплоносителями и с гидродинамическими потерями, могут быть использованы для расчета потерь эксергетической мощности в теплоутилизационных системах и в их отдельных элементах, например, в газоздушных пластинчатых теплоутилизаторах.

Выводы

1. Разработаны комплексные методики оценки эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем и их отдельных элементов, основанные на принципах эксергетического анализа, статистических методов планирования эксперимента, структурновариантных методов, методов многоуровневой оптимизации, методов

теории линейных систем и термодинамики необратимых процессов.

2. Использование разработанных методик увеличивает эффективность теплоутилизационных систем и их отдельных элементов, поскольку повышение результативности оптимизации позволяет при разработке их конструкций использовать параметры, максимально приближенные к оптимальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бродянский В.М. (1967) Эксергетический метод и его приложения, М.: «Мир», 286с.
2. Дьярмати И. (1974) Неравновесная термодинамика, М.: «Мир», 247с.
3. Пехович А.И. (1976) Расчеты теплового режима твердых тел. / Жидких В.М. Ленинград. Энергия, 351.
4. Pardo E. (1991) Analisis Exergetico y Termoeconomico de Procesos industriales. Madrid, 238.
5. Alvarado S. (1994) Cherardelli C. Exergoeconomic Optimization of Cogeneration Plant. Energy 124.
6. Fabbi G. (1998) Heat Transfer Optimisation in Internally Finned Tubes under Laminar Flow Condition // Int. J. Heat Mass Transfer, 41, 1243-1253.
7. Valero A. (1998) Algebraic Thermodynamic Analysis of Energy Systems / Torres C. ASME Book no. G00452 WAM, 7, 13 – 23.
8. Фиалко Н.М. (2011) Эксерго-технологическая эффективность газоздушных теплоутилизаторов энергетических установок / Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Степанова А. И. и др. // Промышленная теплотехника, 33(3), 42 – 49.
9. Фиалко, Н.М., Пресіч, Г.О., Навродська, Р.О., Гнедаш, Г.О. (2013). Екологічна ефективність комбінованих систем утилізації теплоти викидних газів котельної установки. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва, (755), 429–434.
10. Фиалко Н.М. (2014) Эффективность теплоутилизационной установки для котельных, оптимизированной различными методами / Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А. и др. // Промышленная теплотехника, 36(1), 41 – 46.
11. Навродська, Р.О. (2015). Підвищення ефективності теплоутилізаційних технологій для котельних установок комунальної теплоенергетики. Науковий вісник НЛТУ України, 25(9), 225–229.
12. Степанова А.И. (2016) Макроскопическая модель трехфазной термодинамической системы переменной массы // Энергетика і автоматика, (4), 133-144.
13. Фиалко Н.М. (2017) Анализ эффективности котельной установки с комбинированной теплоутилизационной системой при различных режимах работы котла / Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А. и др. // Промышленная теплотехника, 39(1), 33 – 39.

14. Navrodska R. (2018). Експериментальні дослідження теплообміну під час глибокого охолодження продуктів згоряння газоспоживальних котлів / Navrodska, R.A., Stepanova, A.I., Shevchuk, S.I., Gnedash, G.A., &

Presich, G.A. Науковий вісник НЛТУ України, 28(6), 103–108. <https://doi.org/10.15421/40280620>.

COMPREHENSIVE METHODS OF EVALUATION OF EFFICIENCY AND OPTIMIZATION OF HEAT-UTILIZATION SYSTEMS

Fialko M., Stepanova A., Shevchuk S., Sbrodova G.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zheliabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.04>

At present, Ukraine has the necessary potential for the implementation of effective energy-saving technologies for heat recovery, and therefore the problem of their development and implementation is relevant for the country's energy sector. The solution of this problem is related to the need for systematic studies of the efficiency of optimization of heat recovery facilities from the standpoint of modern methodological approaches. The paper outlines the main stages in the development of integrated methods for assessing the efficiency and optimization of heat recovery systems based on the principles of exergic analysis, statistical methods for planning the experiment, structured variational methods, multilevel optimization methods, the theory of linear systems and the thermodynamics of irreversible processes. Examples and illustrations illustrate some of the stages in the development of complex methods. The necessary general step in the development of methodologies is the development of new performance criteria. Such criteria are highly sensitive to changes in the regime and design parameters of heat recovery systems due to the inclusion of some exergic characteristics in them. The developed criteria also serve as target optimization functions.

For individual elements of heat recovery systems, efficiency and optimization methods usually include the definition of the functional dependencies of the selected efficiency criteria on the main parameters. For this, balance methods of exergic analysis and statistical methods of experiment planning are used. If such dependencies are established, optimization is carried out using known mathematical methods. For complex heat recovery systems involving a large number of elements, it is not possible to establish general analytical dependencies of the optimization objective functions on the parameters of the system when constructing mathematical models necessary for their optimization. Complex methods based on the basic principles of structural-variant methods, methods of multilevel optimization, the theory of linear systems, and the thermodynamics of irreversible processes have been developed for such cases. For this purpose, structural diagrams of plants, block diagrams of multilevel optimization have been developed, complete input matrices have been constructed, mathematical models for the processes under investigation have been developed, formulas have been derived for calculating the loss of exergy power in heat conduction processes and formulas for calculating dissipators of exergy. A well-founded choice of the methodology for evaluating efficiency and optimization raises the effectiveness of optimization, since it allows the use of parameters maximally close to optimal when developing the heat recovery system design, which in turn increases the efficiency of the system.

References 14, figures 5.

Key words: heat-utilization systems; complex methods; efficiency; optimization.

1. Brodyansky V. (Ed.), (1967). Eksergeticheskiy metod i yego prilozheniya [The exergy method and its applications]. Moskva: Mir, 286, [in Russian].
2. D'yarmati I. (Ed.), (1974). Neravnovesnaya termodinamika [Nonequilibrium thermodynamics]. Moskva: Mir, 247, [in Russian].
3. Pekhovich A. (1976). Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel [Calculations of the thermal regime of solids] / Zhydkykh V. Leninhrad: Enerhiya, 351. [in Russian].
4. Pardo E. (1991) Analisis Exergetico y Termoeconomico de Procesos industriales. Madrid, 238.
5. Alvarado S. (1994) Cherardelli C. Exergoeconomic Optimization of Cogeneration Plant. Energy 124.
6. Fabbi G. (1998) Heat Transfer Optimisation in Internally Finned Tubes under Laminar Flow Condition // Int. J. Heat Mass Transfer, 41,1243-1253.
7. Valero A. (1998) Algebraic Thermodynamic Analysis of Energy Systems / Torres C. ASME Book no. G00452 WAM, 7, 13 – 23.
8. Fialko N. (2011). Eksergo-tekhnologicheskaya effektivnost' gazovozdushnykh teploutilizatorov energeticheskikh ustanovok [Exergo-technological efficiency of gas-air heat-recovery devices of power plants] / Fialko N., Prokopov V., Stepanova A. et al. Promyshlennaya teplotekhnika 33(3), 42-49. [in Russian].
9. Fialko, N.M. (2013). Ekolohichna efektyvnist kombinovanykh system utylizatsiyi teploty vykydnykh haziv kotelnoyi ustanovky [Ecological efficiency of combined heat recovery systems waste of exhaust gases for boiler plant]. Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika. Teoriya i praktyka budivnytstva [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. The theory and practice of construction] / Fialko, N., Presich, G., Navrodska, R., Gnedash, G. (755), 429 – 434. (in Ukr.)
10. Fialko N. (2014). Effektivnost' teploutilizatsionnoy ustanovki dlya kotel'nykh, optimizirovannoy razlichnymi metodami [The effectiveness of a heat recovery boiler installation optimized by various methods] / Fialko N., Stepanova A., Navrodska R. et al. Promyshlennaya teplotekhnika. 36(1), 41-46. [in Russian].
11. Navrodska R. (2015). Pidvyshchennya efektyvnosti teploutylizatsiynykh tekhnolohiy dlya kotelnykh ustanovok komunalnoyi teploenerhetyky [Improving the efficiency of heat utilization technologies for municipal heating boilers]. Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny [Scientific Bulletin of UNFU], 25(9), 225–229. (in Ukr.)
12. Stepanova A. (2016) Macroscopic model of a three-phase thermodynamic system of variable mass // Enerhetyka y avtomatyka, (4),133-144 (in Rus.).
13. Fialko N. (2017). Analiz effektivnosti kotel'noy ustanovki s kombinirovannoy teploutilizatsionnoy sistemoy pri razlichnykh rezhimakh raboty kotla [Analysis of the efficiency of the boiler plant with a combined heat recovery system under various operating conditions of the boiler] / Fialko N., Stepanova A., Navrodska R. et al. Promyshlennaya teplotekhnika. 39(1), 33-39. [in Russian].
14. Navrodska R. (2018). Eksperymentalni doslidzhennya teploobminu pid chas hlybokoho okholodzhennya produktiv zhoryannya hazospozhyvalnykh kotliv [Experimental investigation of heat-transfer at deep cooling of combustion materials of gas-fired boilers] / Navrodska R., Stepanova A., Shevchuk S., Gnedash G., Presich G. Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny [Scientific Bulletin of UNFU], 28(6), 103–108. <https://doi.org/10.15421/40280620> (in Ukr.)

Отримано 17.09.2018

Received 17.09.2018