

УДК 621.036.7

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ
КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ
СИСТЕМЫ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

А.И. Степанова, кандидат технических наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев

e-mail: nmfialko@ukr.net

Аннотация. *Изложены результаты анализа эффективности и оптимизации комбинированной теплоутилизационной системы котельной установки, предназначенной для подогрева воды и дутьевого воздуха. Для анализа эффективности и оптимизации указанной установки в работе использованы комплексные методы, сочетающие элементы эксергетического анализа с методами теории графов, теории линейных систем, методами многоуровневой оптимизации.*

Ключевые слова: *эффективность, оптимизация, теплоутилизационная система.*

Одним из ключевых направлений энергосбережения является повышение эффективности использования топлива в котлоагрегатах путем глубокой утилизации теплоты отходящих газов. Осуществление режима глубокой утилизации на протяжении всего отопительного сезона возможно в установке, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему, предназначенную для подогрева нескольких теплоносителей. Для анализа эффективности и оптимизации указанной установки в работе использованы комплексные методы, сочетающие элементы эксергетического анализа с методами теории графов, теории линейных систем, методами многоуровневой оптимизации [1-3].

Цель исследований – повышение эффективности комбинированной теплоутилизационной системы котельной установки на основе оптимизации ее параметров.

Материалы и методика исследований. В общем случае в комбинированных теплоутилизационных системах связи между отдельными теплообменниками существуют в трех видах: с последовательным, параллельным и смешанным соединениями элементов. Количество теплообменников в теплоутилизационной системе и выбор типа связи между ними определяется необходимостью снижения температуры дымовых газов, проходящих через теплообменники, до заданной величины с помощью нескольких теплоносителей. Это позволяет осуществить конденсационный режим работы теплоутилизационного оборудования котельных установок на протяжении всего отопительного периода, что обеспечивает общее повышение КПД котла на 13,8 % [4].

Представляет интерес найти оптимальное распределение теплообменников в такой системе с точки зрения обеспечения, как необходимого снижения температуры греющего теплоносителя, так и минимальных суммарных эксергетических потерь в системе теплообменников. При анализе работы системы, состоящей из n теплообменников, эффективным оказывается построение и анализ графа эксергетических потерь. В общем случае под графом эксергетических потерь понимается граф $\Pi=(E \cup H, E_{\text{пот}})=(E \cup H, \Gamma_{\Pi})$, множество вершин которого соответствует греющим E и нагреваемым H потокам. Множество дуг $E_{\text{пот}}$ соответствует возможному распределению потерь эксергии в соответствующих элементах системы теплообменников при взаимодействии греющих и нагреваемых потоков.

$$E \cap H = \emptyset,$$

$$(\forall e_i \in E) \Gamma_{\Pi} e_i \subset H,$$

$$(\forall h_j \in H) \Gamma_{\Pi} h_j = \emptyset,$$

$$E = e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_m,$$

$$H = h_1, h_2, \dots, h_j, \dots, h_n.$$

Оптимальное распределение теплообменников должно обеспечивать снижение температуры дымовых газов от 170-180 °С до 30-40 °С с помощью таких теплоносителей, как вода обратной теплотсети, добавочная вода системы химводоочистки, дутьевой воздух и др. Суммарные эксергетические потери в системе теплообменников должны быть минимальными. В данной работе указанное требование контролировалось с помощью выбранного критерия, который включает величину эксергетических потерь. В качестве такого критерия использован эксерго-технологический критерий, предложенный ранее авторами:

$$k_{ex}^T = E_{пот}^{внут} \cdot m / Q^2,$$

где $E_{пот}^{внут}$ – внутренние потери эксергетической мощности в теплообменнике; m – масса; Q – тепловая мощность.

Результаты исследований. С помощью построенного графа эксергетических потерь найдено оптимальное количество теплообменников в системе и их оптимальное распределение. Возможны два варианта: первый – два последовательно соединенных водогрейных теплоутилизатора и один воздухогрейный, второй – последовательно соединенные водогрейный и воздухогрейный теплоутилизаторы. Проведен анализ работы установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему с одним водогрейным и одним воздухогрейным теплоутилизаторами. Теплоутилизационная система предназначена для подогрева обратной теплотсетевой воды и дутьевого воздуха котлоагрегата.

Для анализа работы указанной установки использован один из методов теории линейных систем, основанный на *RP*-представлении

термодинамических балансов в матричной форме. *RP*-представление термодинамических балансов предполагает, что полная входная матрица для термодинамической системы A состоит из двух матриц: матрицы источников A_R и матрицы продуктов A_P . Первая дает потоки, которые служат источниками для любого элемента системы, вторая – потоки, генерируемые в любом элементе системы. Эти матрицы обладают следующими фундаментальными свойствами:

$$A = A_R - A_P; A_R E = R; A_P E = P; R - P = I.$$

Здесь E, R, P, I – векторы (столбцы), содержащие соответственно эксергию потоков массы, эксергию источников, эксергию продуктов, потерю эксергии. Для исследуемой установки представлена структурная схема, в которой устанавливаются эксергетические, тепловые и энергетические потоки между отдельными дискретными элементами простой структуры (рис.1). На основе *RP*-представления термодинамических балансов и структурной схемы для исследуемой установки построены соответствующие матрицы, с помощью которых рассчитана степень необратимости процессов в установке, проведен сравнительный анализ потерь эксергетической мощности в различных ее элементах, определен относительный вклад каждого элемента в суммарную необратимость установки.

Далее приведены некоторые из построенных матриц:

$$A_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

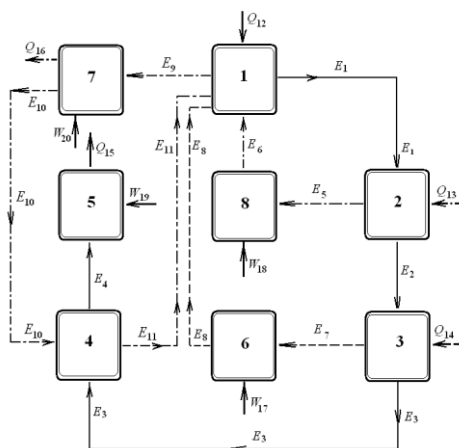


Рис.1. Структурная схема установки:

1 – котел; 2,3 – теплоутилизаторы

водогрейный и воздухогрейный; 4 – газоподогреватель; 5 – дымосос;

6 – вентилятор; 7,8 – насосы; \longrightarrow – дымовые газы; $-\ - \longrightarrow$ – воздух;

$-\ - \cdot \longrightarrow$ – вода; $E_1 - E_{11}$ – эксергетические потоки; $Q_{12} - Q_{16}$ – тепловые

$-\ - \cdot \longrightarrow$ потоки; $W_{17} - W_{20}$ – энергетические потоки

На рис. 2 представлены результаты проведенных для комбинированной теплоутилизационной системы исследований на основе *RP*-представления термодинамических балансов.

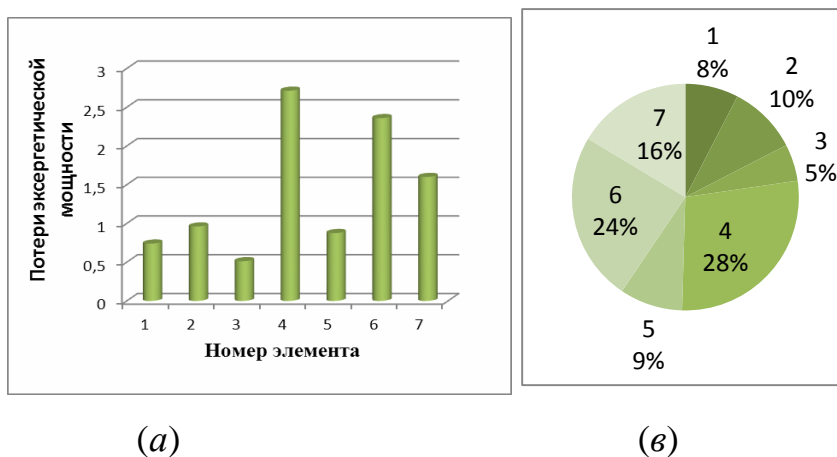


Рис.2. Потери эксергетической мощности (кВт) в элементах теплоутилизационной системы и относительный вклад каждого элемента в общие потери эксергетической мощности:

1 – теплоутилизатор водогрейный;

2 – теплоутилизатор воздухогрейный; 3 – газоподогреватель; 4 – дымосос;

5 – вентилятор; 6,7 – насосы

Как видно из рис.2, наибольшие потери эксергетической мощности происходят в теплонасосной системе. Проведенные исследования позволили внести в схему установки соответствующие конструктивные изменения.

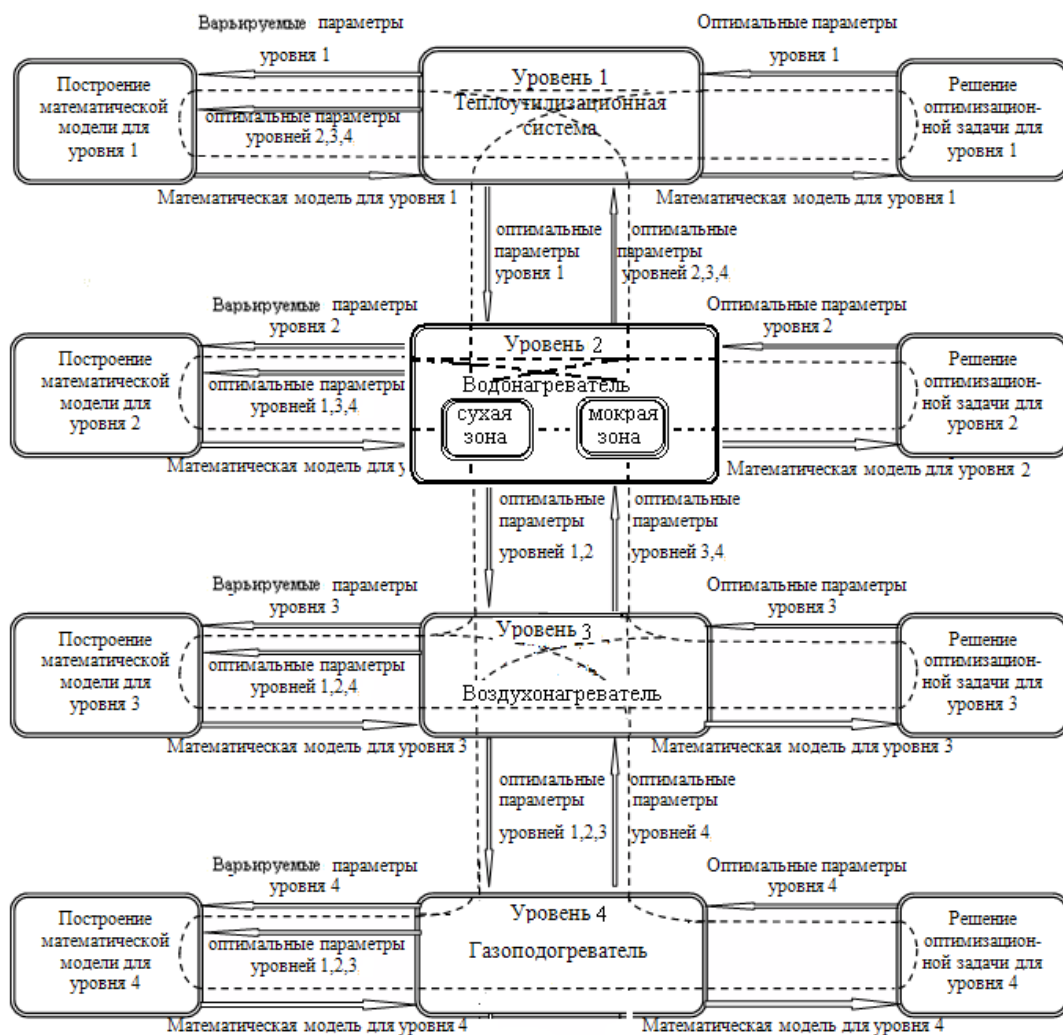


Рис.3. Блок-схема многоуровневой оптимизации

В соответствии с методом многоуровневой оптимизации для рассматриваемой теплоутилизационной установки проведено разделение на уровни оптимизации, разработана блок-схема оптимизации, схема рекурсивного обхода уровней, проведен выбор методов построения математических моделей, целевых функций оптимизации и варьируемых параметров для каждого уровня (рис.3). На основе проведенных исследований определены оптимальные режимные и конструкционные параметры комбинированной теплоутилизационной системы (таблица). Полученные на

основе применения метода многоуровневой оптимизации для комбинированной теплоутилизационной системы оптимальные параметры позволяют повысить ее эффективность на 2,5-3,0 %, по сравнению с использованием других методов.

**Оптимальные режимные и конструкционные параметры
комбинированной теплоутилизационной системы**

Уровень	Варьируемые параметры	Обозначение	Размерн.	Оптимальные значения
Тепло-утилизационная система	Отношение влагосодержания дымовых газов на входе и выходе	$W_{вх}^{дг} / W_{вых}^{дг}$	-	2,9 ÷ 3,1
	Средняя скорость дымовых газов	$V_{г}$	м/с	8,0 ÷ 10,0
	Средняя скорость воды	$V_{в}$	м/с	0,9 ÷ 1,1
Теплоутилизатор водогрейный конденсационный	Отношение влагосодержания дымовых газов на входе и выходе	$W_{вх}^{дг} / W_{вых}^{дг}$	-	1,5 ÷ 2,0
	Отношение чисел Рейнольдса дымовых газов и воды	$Re^{дг} / Re^{вод}$	-	0,5 ÷ 0,9
"Сухая" зона водогрейного теплоутилизатора	Высота ребра	h	мм	10,0 ÷ 11,0
	Толщина ребра	b	мм	0,4 ÷ 0,6
	Межреберный шаг	s	мм	3,0 ÷ 3,5
"Мокрая" зона водогрейного теплоутилизатора	Высота ребра	h	мм	8,0 ÷ 10,0
	Толщина ребра	b	мм	0,4 ÷ 0,6
	Межреберный шаг	s	мм	4,0 ÷ 5,0

Теплоутилизатор воздухогрейный	Отношение влажностендержания дымовых газон на входе и выходе	$W_{вх}^{дг} / W_{вых}^{дг}$	-	1,6 ÷ 2,0
	Ширина пластины	$a_{пл}$	мм	1350 ÷ 1470
	Высота пластины	$b_{пл}$	мм	1850 ÷ 2000
Газоподогреватель	Высота ребра	h	мм	10,0 ÷ 11,0
	Толщина ребра	b	мм	0,4 ÷ 0,6
	Межреберный шаг	s	мм	3,0 ÷ 3,5

Выводы

1. С помощью представлений теории графов найдено оптимальное количество теплообменников в комбинированной теплоутилизационной системе котельной установки и их оптимальное распределение, позволяющее осуществить режим глубокой утилизации теплоты на протяжении всего отопительного сезона.

2. С использованием *RP*-представления термодинамических балансов в матричной форме проведен сравнительный анализ потерь эксергетической мощности в различных элементах установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему, предназначенную для подогрева воды и дутьевого воздуха, определена общая работоспособность установки и относительный вклад каждого элемента в ее суммарную необратимость.

3. Установлен метод оптимизации, приоритетный для комбинированных теплоутилизационных систем. Оптимальные параметры, полученные для комбинированной теплоутилизационной системы, предназначенной для подогрева обратной теплосетевой воды и дутьевого воздуха котлоагрегата, на

основе применения метода многоуровневой оптимизации позволяют повысить ее эффективность на 2,5-3,0%, по сравнению с использованием других методов.

Список литературы

1. Эксергетический расчет технических систем. Справочное пособие / Под ред. А.А. Долинского. – К.: Наукова думка, 1991. – 360 с.
2. Diestel R. Graph Theory, Electronic Edition. – NY: Springer–Verlag. 2005. – 422 p.
3. Pardo E.D. Analisis Exergetico y Termoeconomico de Procesos industriales. – Madrid.,1991. – 387 p.
4. Долинский А.А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой энергетики / [А.А. Долинский, Н.М. Фиалко, Р.А. Навродская, Г.А. Гнедаш] // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, №4. – С. 27 – 34.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КОМБІНОВАНОЇ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

А. І. Степанова

Анотація. *Викладено результати аналізу ефективності та оптимізації комбінованої теплоутилізаційної системи котельної установки, призначеної для підігрівання води та дутьового повітря. Для аналізу ефективності та оптимізації вказаної установки в роботі використано комплексні методи, що поєднують елементи ексергетичного аналізу з методами теорії графів, теорії лінійних систем, методами багаторівневої оптимізації.*

Ключові слова: *ефективність, оптимізація, теплоутилізаційна система*

**THE ANALYZIS OF EFFICIENCY AND OPTIMIZATION
OF COMBINED DEVICE FOR THERMOUTILYZING
BOILER SYSTEM**

A. Stepanova

Annotation. *Results of the analyzis of efficiency and optimization of combined device for thermoutilyzing boiler system are exposed. It is supposed to be used for heating of water and blast gas. For analysis author has used complex methods, the elements of exegetic approach combining with graph theory, theory of linear systems and methods of multilevel optimization.*

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