

УДК 621.036.

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ  
ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК  
(ЧАСТЬ 1)**

*Н. М. Фиалко, чл.-корр. НАНУ, зав. отделом*

*А. И. Степанова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник*

*Р. А. Навродская, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

*e-mail: nmfialko@ukr.net*

**Аннотация.** *Целью исследования является повышение эффективности установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему для подогрева воды и дутьевого воздуха, на основе анализа потерь эксергетической мощности. Анализ эффективности и оптимизация таких установок должны базироваться на современных комплексных подходах, которые включают статистические методы планирования эксперимента, методы эксергетического анализа, методы теории линейных систем, структурные, структурно-вариантные методы, методы многоуровневой оптимизации и др. Разработка и применение методик, основанных на том или ином сочетании указанных методов, позволяет обеспечивать максимальную эффективность таких установок. Для исследуемой установки анализ эффективности проводился на основе разработанной методики, включающей элементы эксергетического анализа и один из методов теории линейных систем – метод RP-представления термодинамических балансов в матричной форме. Разработанная методика применяется к оценке эффективности указанной установки при различных режимах работы котла. Для реализации методики разработана структурная схема установки, в которой идентифицированы все термодинамические потоки между отдельными дискретными элементами простой структуры, входящими в установку. Структурная схема служит для определения характеристик потоков и соответствующих элементов входной матрицы. Для построения полной входной матрицы записаны также балансы массы, энергии и эксергии в матричной форме. Расчет потерь эксергетической мощности в различных элементах установки при различных режимах работы котла позволил установить, что оптимальная работа установки, происходит при мощности котла, составляющей 50...60 % его установленной мощности.*

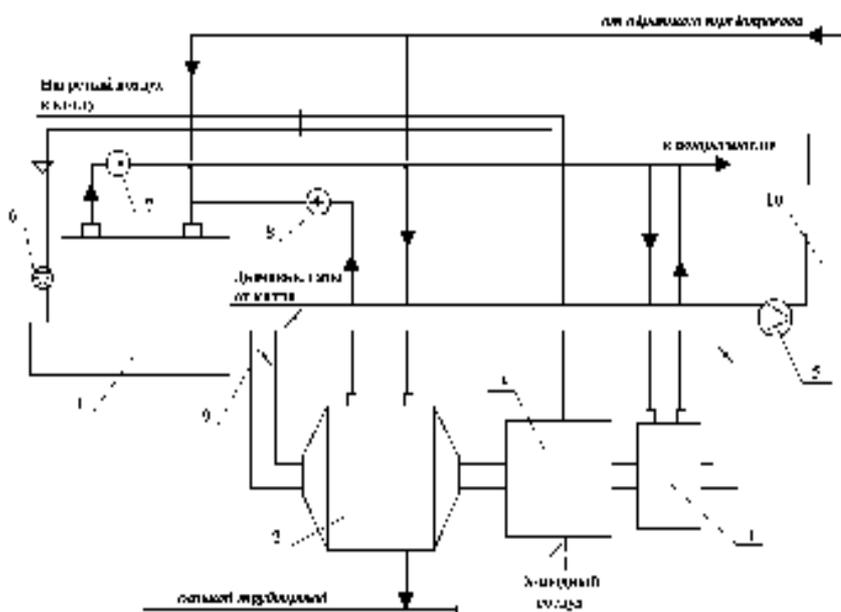
**Ключевые слова:** *теплоутилизационная система, эксергетический анализ, термодинамические балансы, матрица*

**Актуальность.** Прогрессивно растущие цены на природный газ в Украине обуславливают необходимость разработки и внедрения экономичного теплоутилизационного оборудования для энергетических установок различного типа, в том числе и комбинированных теплоутилизационных систем котельных установок. Подобные разработки предполагают использование современных эффективных методик исследования эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем, основанных на комплексных подходах к решению проблемы. Поэтому создание таких методик является актуальной научной задачей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Одной из причин, сдерживающих широкое внедрение технологий утилизации теплоты, является их недостаточная эффективность при определенных режимах эксплуатации. Речь идет об ограниченности работы теплоутилизационных установок с глубокой утилизацией теплоты на протяжении всего отопительного сезона. Современное состояние проблемы характеризуется тенденцией к разработке и внедрению новых теплоутилизационных установок, в которых осуществляется комбинированное использование утилизированной теплоты для подогрева обратной теплосетевой воды и более холодного теплоносителя, например, сырой воды системы химводоочистки или дутьевого воздуха. Такие установки позволяют осуществлять глубокую утилизацию теплоты в течение всего отопительного периода [1-3]. Анализ их эффективности и оптимизация должны базироваться на современных комплексных подходах, которые включают статистические методы планирования эксперимента, методы эксергетического анализа, методы теории линейных систем, структурные, структурно-вариантные методы, методы многоуровневой оптимизации и др. Разработка и применение методик, основанных на том или ином сочетании указанных методов, позволяет обеспечивать максимальную эффективность таких установок [4-7].

**Цель исследования** – повышение эффективности установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему для подогрева воды и дутьевого воздуха, на основе анализа потерь эксергетической мощности.

**Материалы и методы исследования.** В части 1 данной работы проведен анализ эффективности установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему, предназначенную для подогрева воды и дутьевого воздуха (рис. 1).



**Рис.1. Принципиальная схема установки:**

- 1 – котел; 2, 3 – водогрейный и воздухогрейный теплоутилизаторы; 4 – газоподогреватель; 5 – дымосос; 6 – вентилятор; 7, 8 – насосы

В такой установке благодаря совместному использованию водо- и воздухогрейного теплоутилизаторов обеспечивается конденсационный режим работы теплоутилизационного оборудования на протяжении всего отопительного сезона. Так в холодный период года (при  $t_0 < 0$  °С) глубокая утилизация теплоты дымовых газов может быть реализована преимущественно за счет подогрева холодного воздуха, а в осенне-весеннее время (при  $t_0 > 0$  °С) –

преимущественно за счет подогрева воды более низкой температуры ( $t < 50$  °С) в обратной магистрали котельной.

Для анализа эффективности установки разработана методика, сочетающая элементы эксергетического анализа с одним из методов теории линейных систем, методом *RP*-представления термодинамических балансов в матричной форме. Разработанная методика применяется к оценке эффективности указанной установки при различных режимах работы котла.

Для реализации указанной методики для исследуемой установки записываются балансы массы, энергии и эксергии в матричной форме:

$$\begin{aligned}A_M M &= 0, \\AW &= 0, \\AE &= E_{\text{пот}}.\end{aligned}\tag{1}$$

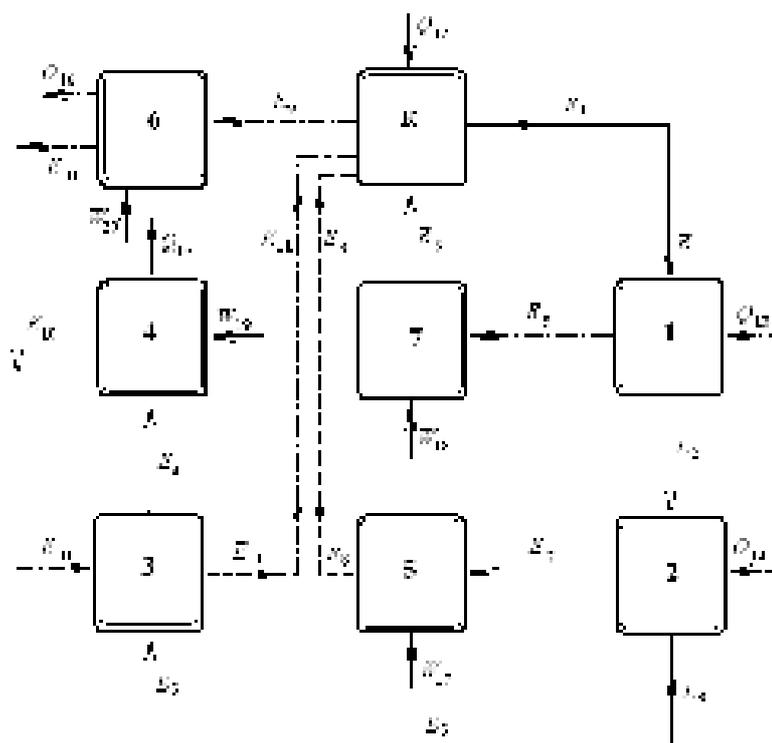
Здесь  $A_M$  – матрица входящих масс;  $M$  – столбец (вектор), содержащий потоки массы;  $A$  – полная входная матрица;  $W$  – столбец, содержащий потоки энергии;  $E$  – столбец, который содержит эксергию потоков массы, тепла и работы;  $E_{\text{пот}}$  – искомый столбец (вектор), элементы которого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

Метод *RP*-представления термодинамических балансов предполагает, что полная входная матрица  $A$  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:

$$\begin{aligned}A &= A_R - A_P \\A_R E &= R, \\A_P E &= P, \\R - P &= E_{\text{пот}}.\end{aligned}$$

Здесь  $R$  и  $P$  – векторы (столбцы), содержащие эксергии источников и продуктов соответственно.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В рамках указанной методики разработана структурная схема установки, в которой идентифицированы все термодинамические потоки между отдельными дискретными элементами простой структуры, входящими в установку. Структурная схема служит для определения характеристик потоков и соответствующих элементов входной матрицы.



**Рис.2. Структурная схема установки:**

К – котел; 1, 2 – водогрейный и воздухогрейный теплоутилизаторы; 3 – газоподогреватель; 4 – дымосос; 5 – вентилятор; 6, 7 – насосы;  $\dashrightarrow$  – дымовые газы,  $\dashrightarrow$  – воздух,  $\dashrightarrow$  – вода;  $E_1 - E_{11}$  – эксергетические потоки;  $Q_{12} - Q_{16}$  – тепловые потоки;  $W_{17} - W_{20}$  – энергетические потоки

В табл. 1 представлены результаты анализа, проведенного в соответствии со структурной схемой исследуемой установки для определения характеристик потоков и соответствующих элементов входной матрицы.

**1. Характеристики потоков установки**

№ элем	Элемент установки	№ потока	$E$ , кВт	Тип потока	Элемент в матрице
	Котел	1	9,89	продукт	+1
		6	228,30	продукт	-1
		8	0,23	продукт	-1
		9	456,00	продукт	+1
		11	11,91	продукт	-1
		12	1207,50	источник	+1
1	Теплоутилизатор водогрейный	1	9,89	источник	+1
		2	2,55	источник	-1
		5	227,90	продукт	+1
		13	221,30	источник	+1
2	Теплоутилизатор воздухогрейный	2	2,55	источник	+1
		3	1,49	источник	-1
		7	0,10	продукт	+1
		14	0	источник	+1
3	Газонагреватель	3	1,49	источник	+1
		4	2,00	источник	-1
		10	12,94	источник	+1
		11	11,91	продукт	+1
4	Дымосос	4	2,00	продукт	-1
		15	2,29	продукт	+1
		19	3,00	источник	+1
5	Вентилятор	7	0,10	продукт	-1
		8	0,23	продукт	+1
		17	1,00	источник	+1
6	Насос	9	456,00	продукт	-1
		10	12,94	продукт	+1
		16	450,70	продукт	+1
		20	10,00	источник	+1
7	Насос	5	227,90	продукт	-1
		6	228,30	продукт	+1
		18	2,00	источник	+1

Построена полная входная матрица  $A$  имеет следующий вид:

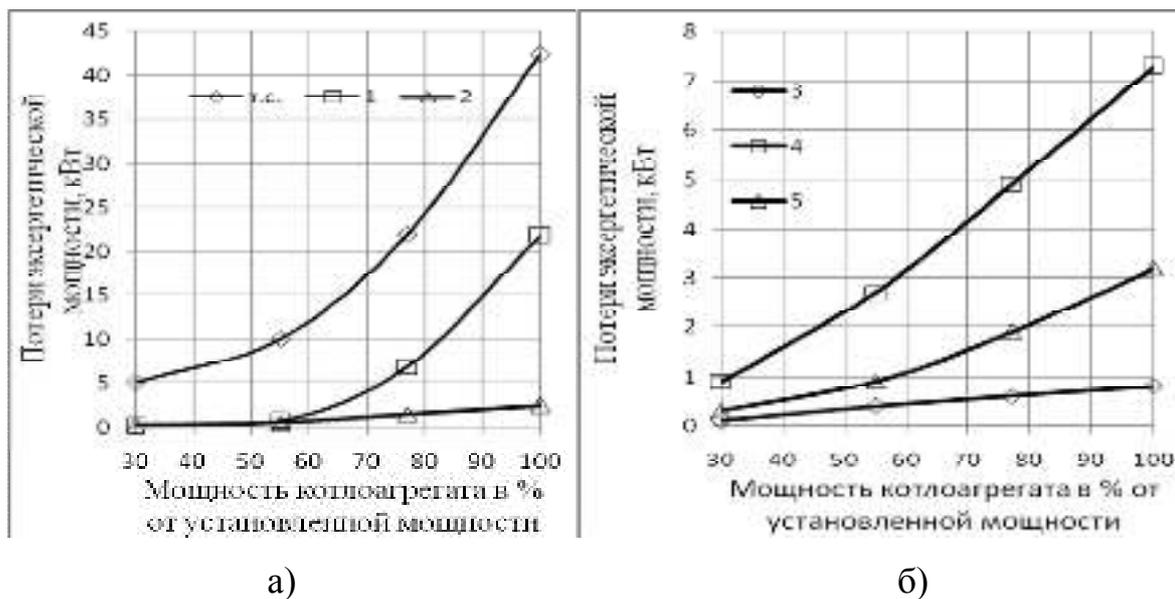
$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0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

В построенной матрице ряды соответствуют элементам установки, а столбцы – эксергетическим потокам, обмениваемому теплу и потребляемой энергии. С помощью входной матрицы рассчитаны потери эксергетической мощности в установке при различных режимах работы котла и определен относительный вклад каждого элемента теплоутилизационной системы в суммарную необратимость процессов в системе (рис. 3-5).

Как видно из рисунков, наименьшие потери эксергетической мощности  $E_{\text{пот}}$ , кВт при всех значениях мощности котла происходят в воздухогрейном теплоутилизаторе и в газоподогревателе. Относительный вклад водогрейного теплоутилизатора в суммарную необратимость процессов в теплоутилизационной установке увеличивается от 6,0 % до 51,0 % при увеличении мощности котла от 30 % до 100 % установленной мощности. Общий вклад насосной системы и системы трубопроводов, соединяющей основные элементы, в суммарную необратимость теплоутилизационной установки довольно значителен при всех значениях мощности котла. Он уменьшается от 89,2 % до 40,7 % при увеличении мощности котла от 30 % до 100 % установленной мощности.

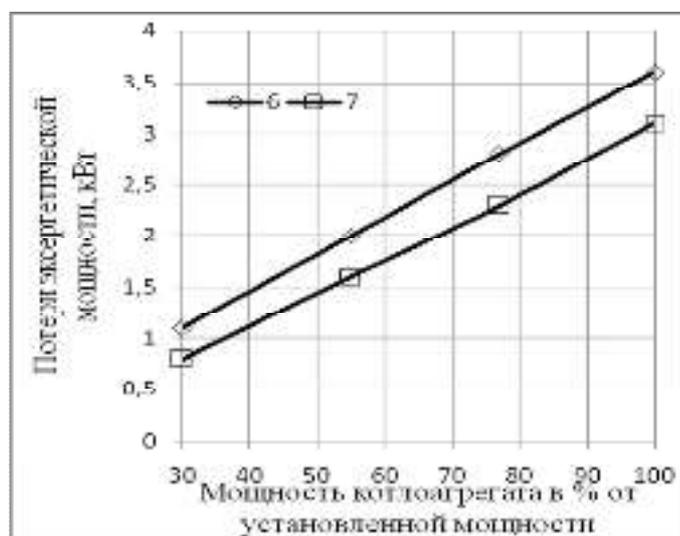
Как следует из рисунков, графики, иллюстрирующие потери эксергетической мощности в теплоутилизационной системе и в водогрейном теплоутилизаторе в зависимости от мощности котла, имеют два выраженных участка. На первом участке при изменении мощности котла от 30 % до 60 %

установленной мощности происходит незначительное увеличение потерь эксергетической мощности в теплоутилизационной системе (5...12 кВт).



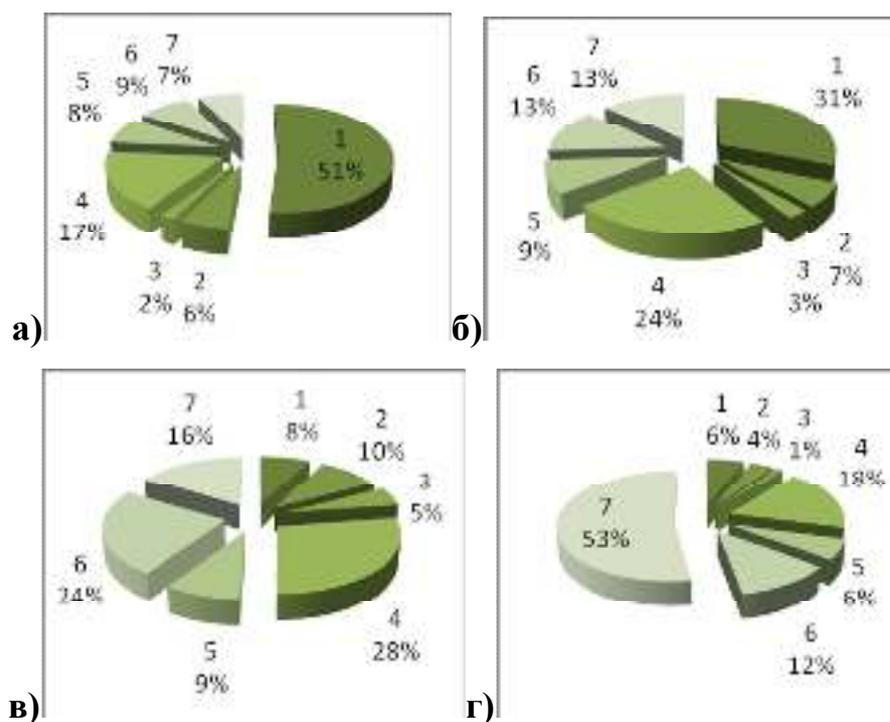
**Рис. 3. Потери эксергетической мощности  $E_{пот}$  в зависимости от мощности котла,**

а): т.с. – теплоутилизационная система; 1 – водогрейный теплоутилизатор; 2 – воздухогрейный теплоутилизатор; б): 3 – газоподогреватель; 4 – дымосос; 5 – вентилятор



**Рис. 4. Потери эксергетической мощности  $E_{пот}$  в зависимости от мощности котла:**

6,7– насосы



**Рис. 5. Относительный вклад потерь эксергетической мощности каждого элемента в суммарные потери теплоутилизационной системы при различной мощности котла:**

а) 100 % установленной мощности котла, б) 77 %, в) 55 %, г) 30 %

Здесь основные потери эксергетической мощности приходятся на насосную систему и на систему трубопроводов, соединяющую основные элементы. На втором участке при изменении мощности котла от 60 % до 100 % установленной мощности потери эксергетической мощности в теплоутилизационной системе начинают резко возрастать, увеличиваясь, примерно, на 30 кВт, и здесь основные потери эксергетической мощности приходятся на водогрейный теплоутилизатор. Регулировать потери эксергетической мощности в насосной системе и системе трубопроводов легче и целесообразнее, чем в теплоутилизаторах. Учитывая сказанное можно сделать вывод, что оптимальная работа установки должна происходить при мощности котла, составляющей 50...60 % его установленной мощности.

- Выводы и перспективы.** 1. Для анализа эффективности комбинированной теплоутилизационной системы котельной установки, предназначенной для подогрева воды и дутьевого воздуха, разработана методика, основанная на использовании комплексного подхода, сочетающего методы эксергетического анализа с одним из методов теории линейных систем – методом *RP*-представления термодинамических балансов в матричной форме.
2. На основе разработанной методики рассчитаны потери эксергетической мощности в различных элементах теплоутилизационной системы, определены общие потери эксергетической мощности в системе и относительный вклад каждого ее элемента в суммарную необратимость процессов в системе при различных режимах работы котла.
3. Установлено, что оптимальная работа установки, происходит при мощности котла, составляющей 50...60 % его установленной мощности.

#### Список литературы

1. Бродянский В. М. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Издательство «Мир». – 1967. – 247 с.
2. Pardo E. D. Analisis Exergetico y Termoeconomico de Procesos industriale Madrid, 1991. – 238 p.
3. Долинский А. А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой энергетики / Долинский А. А., Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Гнедаш Г. А. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, №4. – С. 27 – 34.
4. Фиалко Н. М. Термодинамическая оптимизация и анализ эффективности теплоутилизационных систем котельных агрегатов / Фиалко Н. М., Степанова А. И., Пресич Г. А., Навродская Р. А., Шеренковский Ю. В., Малецкая О. Е., Гнедаш Г. А. // Промышленная теплотехника. – 2012. – Т. 34, №2. – С. 98 – 102.
5. Фиалко Н. М. Повышение эффективности котельных установок коммунальной теплоэнергетики путем комбинированного использования теплоты отходящих газов / Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Гнедаш Г. А., Пресич Г. А., Степанова А. И., Шевчук С. И. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2014. – № 15. – С. 126–129.
6. Фиалко Н. М. Эффективность теплоутилизационной установки для котельных, оптимизированной различными методами / Фиалко Н. М., Степанова А. И., Навродская Р. А., Шеренковский Ю. В. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, №1. – С. 41–46.

7. Фиалко Н. М. Анализ эффективности теплоутилизационной установки для нагревания и увлажнения дутьевого воздуха котлоагрегата / Фиалко Н. М., Степанова А. И., Пресич Г. А., Гнедаш Г. А. // Промышленная теплотехника. – 2015. – Т. 37, № 4. – С. 71 – 79.

### **References**

1. Brodyansky, V. (1967). Eksergeticheskiy metod i yego prilozheniya [The exergy method and its applications]. Moscow: Mir, 247

2. Pardo, E. (1991). Analisis exergetico y termoeconomico de procesos industriales. Madrid: Energy, 238.

3. Dolinsky, A. A., Fialko, N. M., Navrodsкая, R. A., Gnedash, G. A. (2014). Osnovnyye printsipy sozdaniya teploutilizatsionnykh tekhnologiy dlya kotel'nykh maloy energetiki [The basic principles of creating heat recovery technologies for small-scale boiler houses]. Promyshlennaya teplotekhnika, 36(4), 27-34.

4. Fialko, N. M., Stepanova, A. I., Navrodsкая, R. A. et al. (2012). Termodinamicheskaya optimizatsiya i analiz effektivnosti teploutilizatsionnykh sistem kotel'nykh agregatov [Thermodynamic optimization and analysis of efficiency of heat recovery systems of boiler units] Promyshlennaya teplotekhnika, 34 (2), 98 – 102.

5. Fialko, N. M., Navrodsкая, R. A., Gnedash G. A. et al. (2014). Povysheniye effektivnosti kotel'nykh ustanovok kommunal'noy teploenergetiki putem kombinirovannogo ispol'zovaniya teploty otkhodyashchikh gazov [Increasing the efficiency of boiler plants of communal heat power engineering by combining the heat of waste gases]. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya», 15, 126–129.

6. Fialko, N. M., Stepanova, A. I., Navrodsкая, R. A. et al. (2014). Effektivnost' teploutilizatsionnoy ustanovki dlya kotel'nykh, optimizirovannoy razlichnymi metodami [The effectiveness of a heat recovery boiler installation optimized by various methods] , Promyshlennaya teplotekhnika, 36(1), 41-46.

7. Fialko, N. M., Stepanova, A. I., Navrodsкая, R. A. et al. (2015). Analiz effektivnosti teplo-utilizatsionnoy ustanovki dlya nagrevaniya i uvlazhneniya dut'yevogo vozdukha kotloagregata [Analysis of the efficiency of the heat recovery unit for heating and humidifying the blast air of the boiler unit]. Promyshlennaya teplotekhnika, 37(4), 71-79.

## **ЕФЕКТИВНІСТЬ КОМБІНОВАНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК ( ЧАСТИНА 1)**

***Н. М. Фіалко, А. І. Степанова, Р. О. Навродська***

**АНОТАЦІЯ.** Метою дослідження є підвищення ефективності установки, яка включає котел і комбіновану теплоутилізаційну систему для підігріву води та дутьевого повітря, на основі аналізу втрат ексергетичної потужності. Аналіз ефективності і оптимізація таких установок повинні базуватися на

*сучасних комплексних підходах, які включають статистичні методи планування експерименту, методи ексергетичного аналізу, методи теорії лінійних систем, структурні, структурно-варіантні методи, методи багаторівневої оптимізації та ін. Розробка і застосування методик, заснованих на тому чи іншому поєднанні зазначених методів, дозволяє забезпечувати максимальну ефективність таких установок. Для досліджуваної установки аналіз ефективності проводився на основі розробленої методики, що включає елементи ексергетичного аналізу і один із методів теорії лінійних систем - метод RP-подання термодинамічних балансів в матричній формі. Розроблена методика застосовується до оцінки ефективності зазначеної установки при різних режимах роботи котла. Для реалізації методики розроблено структурну схему установки, в якій ідентифіковані всі термодинамічні потоки між окремими дискретними елементами простої структури, що входять в установку. Структурна схема служить для визначення характеристик потоків і відповідних елементів вхідної матриці. Для побудови повної вхідної матриці записані також баланси маси, енергії та ексергії в матричній формі. Розрахунок втрат ексергетичної потужності в різних елементах установки при різних режимах роботи котла дозволив встановити, що оптимальна робота установки, відбувається при потужності котла, що становить 50...60% його встановленої потужності.*

**Ключові слова:** *теплоутилізаційна система, ексергетичний аналіз, термодинамічні баланси, матриця*

## **EFFICIENCY OF COMBINED HEAT-UTILIZATION SYSTEMS OF BOILER INSTALLATIONS (PART 1)**

*N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodskaaya*

**Abstract.** *The aim of the work is to increase the efficiency of the installation, which consists of a boiler and a combined heat recovery system for heating water and blast air. For this purpose, the analysis of losses of exergic power in the installation under different operating conditions of the boiler was carried out. The analysis of efficiency and optimization of such facilities should be based on modern integrated approaches. These approaches include statistical methods of experiment planning, methods of exergic analysis, methods of the theory of linear systems, structural, structural-variant methods, methods of multilevel optimization, etc. The development and application of techniques that are based on a combination of these methods make it possible to maximize the effectiveness of such installations. For the installation under investigation, the efficiency analysis was carried out on the basis of the developed technique, which included elements of exergic analysis and the RP-representation of thermodynamic balances in matrix form. The developed technique was applied to an estimation of efficiency of installation at various operating modes of a boiler. To implement the methodology, a structural diagram of the installation has been developed, in which thermodynamic flows between individual discrete elements*

*of a simple structure are indicated. The block diagram serves to determine the characteristics of the streams and elements of the input matrix. To build a complete input matrix, mass, energy and exergy balances in matrix form were also recorded. The least losses of exergy power for all boiler power values occur in the air-heating heat recovery unit and in the gas heater. The relative contribution of the hot-water heat recovery unit to the total irreversibility of the processes in the heat recovery unit increases with increasing boiler output. The total contribution of the pumping system and the piping system to the total irreversibility of the heat recovery unit is quite significant for all boiler output values. It decreases with increasing boiler output. The graphs that illustrate the loss of exergy power in the heat recovery system and in the hot water heat recovery boiler have two distinct sections. In the first section there is an insignificant increase in the losses of exergy power in the heat recovery system. Here, the main losses of exergy power are attributable to the pumping system and to the pipeline system. In the second section, the loss of exergy power in the heat recovery system begins to increase sharply. Here, the main losses of exergy power are attributable to the water heat recovery. It is more expedient to regulate losses of exergic power in the pumping system and piping system than in heat recovery units. This made it possible to establish that the optimal operation of the installation takes place at a boiler capacity that is 50 ... 60% of its installed capacity.*

**Key words:** *heat recovery system, exergy analysis, thermodynamic balances, matrix*