

УДК 621.036.7

## АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УСТАНОВКИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ ПОДОГРЕВА ВОДЫ И ДУТЬЕВОГО ВОЗДУХА КОТЛОАГРЕГАТА

Степанова А.И., канд. техн. наук

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

Показано можливість застосування комплексного підходу, заснованого на використанні методів ексергетичного аналізу та методів теорії лінійних систем, для оцінки працездатності установки, що включає котел та комбіновану теплоутилізаційну систему для підігрівання води та дутьового повітря.

Показана возможность использования комплексного подхода, основанного на применении методов эксергетического анализа совместно с методами теории линейных систем, для оценки работоспособности установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему для подогрева воды и дутьевого воздуха.

The possibility of the integrated approach use, which is based on the exergy analysis methods application jointly with the theory of linear systems methods, to evaluate operational state of the facility, which includes a boiler and a combined mixture heat recovery system for water and blast air heating, were shown.

Библ. 10, табл. 1, рис. 3.

**Ключевые слова:** теплоутилизационная установка, эксергетические потери, матричные балансы. $E$  – эксергетическая мощность; $Q$  – тепловая мощность; $t$  – температура; $W$  – энергия; $\eta_{\text{вх}}$  – эксергетический КПД.**Индексы верхние:**

и – источник;

пр – продукт;

уст – установка;

т.с. – теплоутилизационная система.

**Индексы нижние:**

вх, вых – входной, выходной параметры;

о – окружающая среда;

пот – потери.

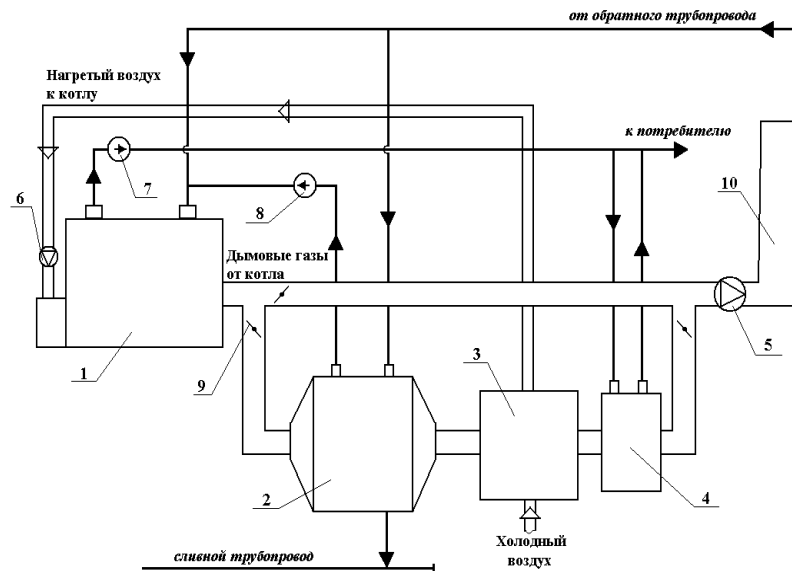
Одним из ключевых направлений энергосбережения в теплоэнергетике является повышение эффективности использования топлива в котлоагрегатах путем глубокой утилизации теплоты отходящих газов. Известные теплоутилизационные технологии для котлов малой мощности (до 30 МВт) в номинальном режиме работы котлоагрегата обеспечивают снижение температуры отходящих газов от 170 °С до 70...80 °С, т.е. до температуры начала конденсации водяных паров на теплообменных поверхностях. Такой температурный уровень уходящих газов в большинстве случаев отвечает увеличению КПД котла на 2...4 %. Дальнейшее повышение КПД котла (до 13,8 %) возможно за счет более глубокого охлаж-

дения отходящих газов, т.е. при работе теплоутилизационного оборудования в конденсационном режиме. При этом использование утилизированной теплоты при относительно небольших нагрузках котла только для подогрева обратной теплосетевой воды реализует конденсационный режим работы теплоутилизационного оборудования лишь в осенне-весенний период. Обеспечить такой режим на протяжении всего отопительного периода возможно в том случае, если в теплоутилизационной системе после водогрейного теплоутилизатора, предназначенного для подогрева обратной теплосетевой воды, установить еще один теплообменник, в котором происходил бы подогрев теплоносителей более низкой температуры,

чем обратная вода теплосети. Такими теплоносителями могут служить, например, добавочная вода, поступающая в систему химводоочистки, дутьевой воздух и др. На рис. 1 приведена схема

установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему, предназначенную для подогрева воды и дутьевого воздуха.

В такой комбинированной установке



**Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 – котел; 2, 3 – водогрейный и воздухогрейный теплоутилизаторы; 4 – газоподогреватель; 5 – дымосос; 6 – вентилятор; 7, 8 – насосы.**

благодаря совместному использованию водо- и воздухогрейных 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 [1,2].

Анализ эффективности и оптимизация энергетических установок, в которых число технологических процессов и элементов оборудования достаточно велико, существенно затруднены. В связи с этим важно найти подходы, позволяющие количественно оценивать их работоспособность. Комплексные методы, сочетающие элементы эксергетического анализа со статистическими методами планирования эксперимента, методами теории линейных систем, со структурными

и структурно-вариантными методами, методами многоуровневой оптимизации позволяют проводить анализ эффективности и оптимизацию сложных комбинированных теплоутилизационных установок. [3-5]. Сравнительный анализ этих методов дает возможность выбирать для определенного типа установок методы исследования эффективности и оптимизации, обеспечивающие получение таких параметров установок, при которых их эффективность максимальна.

В данной работе рассматривается возможность применения к оценке работоспособности установки, включающей указанную комбинированную теплоутилизационную систему, комплексного подхода, основанного на сочетании методов эксергетического анализа с одним из методов теории линейных систем, методом *RP*-представления термодинамических балансов системы в матричной форме [6-10].

Цель работы – оценка суммарных эксергетических потерь установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную си-

стему для подогрева воды и дутьевого воздуха, и относительного вклада каждого элемента теплоутилизационной системы в ее необратимость.

Для реализации указанного комплексного подхода записаны балансы массы, энергии и эксергии исследуемой установки в матричной форме:

$$A_M M = 0, \tag{1}$$

$$A W = 0, \tag{2}$$

$$A E = E_{\text{пот.}} \tag{3}$$

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.

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:

$$A = A_R - A_P, \tag{4}$$

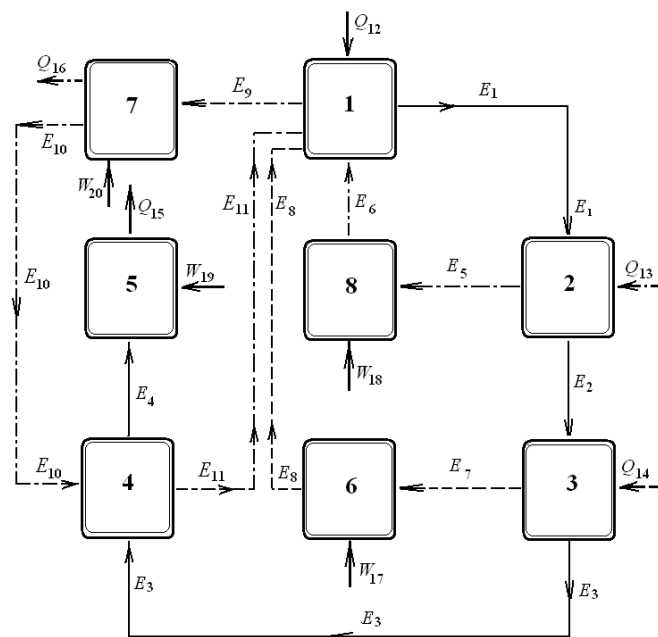
$$A_R E = R, \tag{5}$$

$$A_P E = P, \tag{6}$$

$$R - P = E_{\text{пот.}} \tag{7}$$

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

Исследуемая установка представлена в виде структурной схемы, в которой идентифицированы все термодинамические потоки между отдельными дискретными элементами простой структуры (рис. 2).



**Рис. 2. Структурная схема установки:** 1 – котел; 2, 3 – водогрейный и воздухогрейный теплоутилизаторы; 4 – газоподогреватель; 5 – дымосос; 6 – вентилятор; 7, 8 – насосы;  $\longrightarrow$  – дымовые газы,  $-\!-\!-\!\longrightarrow$  – воздух,  $-\!-\!-\!\longrightarrow$  – вода;  $E_1 - E_{11}$  – эксергетические потоки;  $Q_{12} - Q_{16}$  – тепловые потоки;  $W_{17} - W_{20}$  – энергетические потоки.

В соответствии с методом  $RP$ -представления термодинамических балансов в матричной форме все термодинамические балансы и термодинамические потоки исследуемой установки рассмо-

трены в системе источник–продукт. Установлены типы термодинамических потоков: потоки, которые служат источниками для любого элемента установки, и потоки, генерируемые в элементах.

Тип термодинамического потока определяет значение элемента в матрице (0, +1 или -1).

Так при построении матрицы источников  $A_k$  элемент матрицы с индексами  $i, j$ , будет равен +1, если  $j$ -й поток поступает в  $i$ -й элемент установки, и -1, если  $j$ -й поток вытекает из  $i$ -го элемента установки; данный элемент матрицы будет равен нулю, если  $j$ -й поток пропускает  $i$ -й элемент. При построении матрицы продуктов  $A_p$  элемент матрицы с индексами  $i, j$ , будет равен +1, если  $j$ -й поток, являющийся продуктом, генерируемым в  $i$ -м элементе установки, выходит из

него, и -1 если  $j$ -й поток, являющийся продуктом, генерируемым в другом элементе установки, входит в  $i$ -й элемент установки. Матрицы строятся таким образом, что их столбцы соответствуют потокам массы, энергии и эксергии, а строки – соответствующим элементам установки.

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

Построены матрицы, с помощью которых

Табл. 1. Характеристики потоков установки

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

рассчитана степень необратимости процессов в установке, провен сравнительный анализ потерь эксергетической мощности в различных ее элементах и для теплоутилизационной системы определен относительный вклад каждого ее эле-

мента в суммарную необратимость.

Матрица источников  $A_R$ , матрица продуктов  $A_P$  и полная входная матрица  $A$  имеют следующий вид:

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

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

В построенных матрицах ряды соответствуют элементам установки, а столбцы – эксергетическим потокам, обмениваемому теплу и потребляемой энергии. Размер этих матриц –  $(8 \times 20)$  – 8 элементов установки, 11 эксергетических потоков массы, 5 тепловых потоков и 4 рабочих взаимодействия (потребление энергии). Поскольку построенная входная матрица  $A$  не является квадратной, приведенный выше баланс дает 8 уравнений с 20 неизвестными. Поэтому построена матрицу  $A_\alpha$  размером  $(12 \times 20)$ , которая определяется из дополнительных условий, учитывающих следующие факторы.

1. Эксергию вводимых в установку потоков.
2. Наличие внутренних ветвлений в каждом элементе установки.
3. Наличие остатков и побочных продуктов.

Установлены типы ветвлений, а именно, уточнен тот факт, является ли данная ветвь источником или каналом отвода продукта. Рассчитаны

исходные значения термодинамических характеристик потоков (табл. 1). Построена отвечающая указанным критериям матрица ветвлений  $A_\alpha$ , имеющая размер  $(12 \times 20)$ , в которой использованы результаты расчета эксергетической мощности потоков  $E$  (табл. 1). Ряды матрицы – равные нулю элементы, кроме следующих: для входов и побочных продуктов в столбцах, отвечающих соответствующим потокам, будет стоять значение +1, для остатков – -1, для ветвлений –  $-x_{ij}$  в столбце  $j$  и +1 в столбце  $i$ . Дополнительно определялся вектор (столбец)  $\omega$  размером  $(12 \times 1)$ , который включал в себя следующие элементы: для входов  $E_i = \omega_{ei}$ ; для побочных продуктов  $E_i = \omega_{si}$ ; для остатков  $E_i = \omega_{ri}$ ; для ветвлений  $E_i = 0$ .

$$x_5 = E_2/E_5, \quad x_6 = E_{11}/E_6, \quad x_7 = E_3/E_7; \quad x_{10} = E_{16}/E_{10}. \quad (8)$$

Тогда расширенная входная матрица имеет вид:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} A \\ A_\alpha \end{bmatrix}, (20 \times 20). \quad (9)$$

$$A_{\alpha} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -x_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Полная система уравнений для определения эксергии  $E$  записывается в матричном виде следующим образом:

$$\Lambda E = \Omega, \tag{10}$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}, (20 \times 1) \tag{11}$$

После определения входных матриц для рас-

сматриваемых установок была построена диагональная матрица  $A_k$ , размером  $(8 \times 8)$ , элементы которой  $k$  включают эксергию источников  $E^и$  и эксергию продуктов  $E^{пр}$ :

$$k = 1/\eta_{ex} = E^и/E^{пр}, \tag{12}$$

а также входная матрица эксергетического КПД

$$J: \tag{13}$$

$$J = A_{и} - A_k F_{пр}.$$

$$J = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_1 & 0 & k_1 - k_1 & 0 & k_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 - 1 & 0 & 0 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - 1 & 0 & 0 & 0 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_6 - k_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_7 - k_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_7 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_8 - k_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Для построения указанной матрицы параметры  $k_i$  находились следующим образом.

Если элемент установки имел несколько входов и выходов, то:

для линии передачи продукта:

$$k_i = \sum_i E_{вх,i}^и / \left( \sum_h E_{вых,h}^{пр} - \sum_l E_{вх,l}^{пр} \right) \tag{14}$$

для источниковой линии:

$$k_i = \left( \sum_i E_{вх,i}^и - \sum_j E_{вых,j}^и \right) / \sum_h E_{вых,h}^{пр} \tag{15}$$

Тогда, с учетом результатов, представленных в табл. 1, для каждого потока в исследуемой установке рассчитаны значения параметров  $k_i$  в

матрице  $J$ :

$$k_1 = E_{12} / (E_1 + E_9 - E_6 - E_{11} - E_8); k_2 = (E_1 + E_{13} - E_2) / E_5; \tag{16}$$

$$k_3 = (E_2 + E_{14} - E_3) / E_7; k_4 = (E_3 + E_{10} - E_4) / E_{11};$$

$$k_5 = E_{19} / (E_{15} - E_4); k_6 = E_{17} / (E_8 - E_7);$$

$$k_7 = E_{20} / (E_{10} + E_{16} - E_9); k_8 = E_{18} / (E_6 - E_5);$$

Расширенная входная матрица эксергетического КПД имеет вид:

$$J_c = \begin{bmatrix} J \\ A_{\alpha} \end{bmatrix}, (20 \times 20). \tag{17}$$

Можно показать, что:

$$J_c E = \Omega,$$

$$E = J_c^{-1} \Omega.$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}, (20 \times 1). \quad (18)$$

С помощью матрицы  $J_C^{-1}$ , обратной матрице  $J_C$ , а также уравнений (18) можно определить эксергию каждого потока как функцию КПД элементов оборудования, ветвей и внешних источников, передающих энергию системе.

Далее приведены некоторые результаты проведенных исследований на основе методов эксергетического анализа и метода *RP*-представления термодинамических балансов, Вектор-столбец потерь эксергетической мощности имеет вид:

$$E_{\text{пот}} = \begin{Bmatrix} 982,05 \\ 0,74 \\ 0,96 \\ 0,51 \\ 2,71 \\ 0,88 \\ 2,36 \\ 1,60 \end{Bmatrix}$$

Сумма элементов этого столбца даёт полную потерю эксергии установкой в целом. Сопоставляя значения  $E_{\text{пот},i}$  между собой и сравнивая их с суммарным значением  $E_{\text{пот}}$ , можно получить представление об относительном вкладе каждого элемента в суммарную необратимость установ-

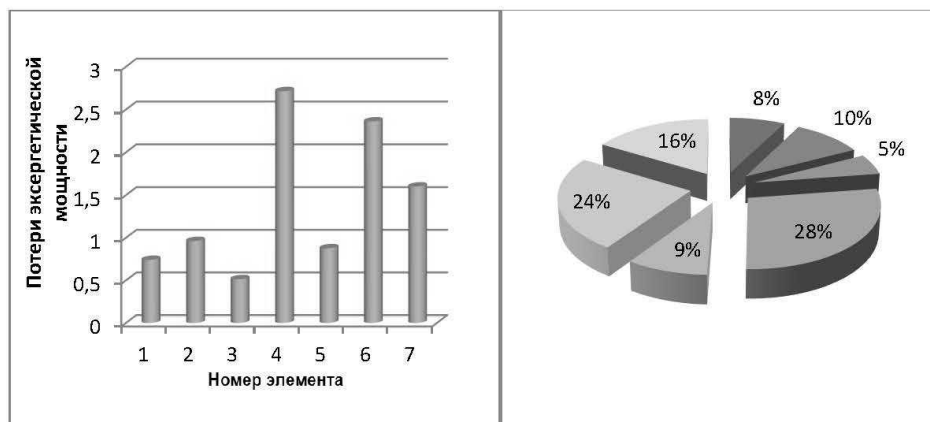
ки. Рассчитана степень необратимости процессов в теплоутилизационной установке, проведен сравнительный анализ потерь эксергии в различных элементах и определен относительный вклад каждого элемента в суммарную необратимость системы. Суммарные потери эксергетической мощности в установке и потери эксергетической мощности в теплоутилизационной системе составляют:

$$E_{\text{пот}}^{\text{уст}} = \sum_{i=1}^7 E_{\text{пот},i} = 991,80 \text{ кВт}; \quad E_{\text{пот}}^{\text{т.с.}} = \sum_{i=2}^7 E_{\text{пот},i} = 9,76 \text{ кВт}.$$

На рис. 2 представлены результаты исследований потерь эксергетической мощности на основе *RP*-представления термодинамических балансов.

Как видно из рис. 2 наибольшие потери эксергетической мощности происходят в теплонасосной системе. С учетом этого вывода в схеме установки проведены соответствующие изменения.

Таким образом, применение к термодинамическим балансам теории линейных систем в сочетании с методами эксергетического анализа позволяет определить в непосредственном виде полную необратимость установки, ее эксергетические характеристики и потерю эксергетической мощности каждым элементом установки. Это позволяет считать, что приведенную выше методику, сочетающую метод *RP*-представления термодинамических балансов в матричной форме и методы эксергетического анализа можно



**Рис. 3. Потери эксергетической мощности  $E_{\text{пот}}$  (кВт) в элементах теплоутилизационной системы и относительный вклад каждого элемента в общие потери эксергетической мощности теплоутилизационной системы:**

**1 – теплоутилизатор водогрейный; 2 – теплоутилизатор воздухогрейный; 3 – газоподогреватель; 4 – дымосос; 5 – вентилятор; 6,7 – насосы.**

применять для оценки работоспособности сложных теплоутилизационных систем.

### Выводы

1. Проанализирована возможность применения комплексного подхода, основанного на использовании методов эксергетического анализа совместно с методами теории линейных систем, для оценки работоспособности установки, включающей котел и комбинированную теплоутилизационную систему для подогрева воды и дутьевого воздуха.

2. На основе *RP*-представления термодинамических балансов построены соответствующие матрицы, с использованием которых рассчитаны потери эксергетической мощности в различных элементах установки, определены общие потери эксергетической мощности теплоутилизационной системы и относительный вклад каждого ее элемента в суммарную необратимость.

3. Установлено, что наибольшие потери эксергетической мощности происходят в теплонасосной системе. С учетом этого вывода в схеме установки проведены соответствующие изменения.

3. Показано, что методика *RP*-представления термодинамических балансов в сочетании с эксергетическими методами успешно реализуется для оценки работы сложных теплоутилизационных систем и может служить инструментом моделирования в них тепловых процессов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Гнедаш Г.А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой энергетики // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, №4. – С. 27 – 34.

2. Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю. В. Эффективность агрегатированных теплоутилизационных систем для котельных с поверхностными конденсационными теплоутилизаторами. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 3. – С. 63–71.

3. Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю. В. Эффективность теплоутилизационной установки для котельных, оптимизированной различными методами. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 1. – С. 41-46.

4. Фиалко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю. В. Оптимизация теплоутилизационной установки стекловаренной печи. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 5. – С. 81-88.

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

6. Valero A., Torres C. Algebraic Thermodynamic Analysis of Energy Systems ASME Book no. G00452 WAM-1988, AES. Vol. 7 P. 13 – 23.

7. Pardo E.D. Analisis Exergetico y Termoeconomico de Procesos industriales. Madrid: –1991. – 238p.

8. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics Wiley & Sons. N V. –1988. – 276p.

9. Alvarado S., Cherardelli C. Exergoeconomic Optimization of Cogeneration Plant. Energy, (19 – 12). 1994. – 124p.

10. Auraher H. Fundamental Aspects of Energy Application to the Analysis and Optimization of Energy Processes. – 2006. – 165p.



## ANALYSIS OF THE APPLICATION COMBINED HEAT RECOVERY SYSTEMS FOR WATER HEATING AND BLAST AIR OF THE BOILER UNIT

**Stepanova A.**

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

The possibility of using an integrated approach based on the use of methods of exergy analysis in conjunction with the methods of the theory of linear systems to evaluate your installation, including boiler and a combined heat and the utilization system to heat the water and blow air. Using *RP*-representation of thermodynamic balance respectively built-sponding matrix on which a comparative analysis of exergy losses in the various elements of the power plant defines the general exergy loss of power and the relative contribution of each element in the total irreversibility of the installation.

References 10, tables 1, figures 3.

**Key words:** heat recovery units, exergetic losses matrix balances.

1. *Dolinsky A., Fialko N., Navrodsкая R., Gnedash G.* Basic principles of heat recovery technologies for boilers of small power. // *Promyshlennaya teplotekhnika*. – 2014. – V. 36, №4. – P. 27 – 34. (Rus.)

2. *Fialko N., Stepanova A., Navrodsкая R., Sherenkovsky Y., Shevchuk S.* Effectiveness

of termoutilizing systems of boiler plants, using surface condensing utilizers. // *Promyshlennaya teplotekhnika*. – 2014. – V. 36, № 3. – P. 63 – 71. (Rus.)

3. *Fialko N., Stepanova A., Navrodsкая R., Sherenkovsky Y.* The effectiveness of a heat recovery boiler installation optimized by various methods. // *Promyshlennaya teplotekhnika*. – 2014. – V. 36, № 1. – P. 41 – 46. (Rus.)

4. *Fialko N., Stepanova A., Navrodsкая R., Sherenkovsky Y.* Optimization of heat recovery installation glass furnace. // *Promyshlennaya teplotekhnika*. – 2014. – V. 36, № 5. – P. 81 – 88. (Rus.)

5. *Fialko N., Stepanova A., Presitsh G., Gnedash G.* Analysis of efficiency heat recovery systems for heating and humidifying the air blast boiler. // *Promyshlennaya teplotekhnika*. – 2015. – V. 37, № 4. – P. 71 – 79. (Rus.)

6. *Valero A., Torres C.* Algebraic Thermodynamic Analysis of Energy Systems ASME Book no. G00452 WAM-1988, AES. Vol. 7 P. 13 – 23.

7. *Pardo E.D.* Analisis Exergetico y Termoeconomico de Procesos industriales. Madrid: –1991. – 238p.

8. *Bejan A.* Advanced Engineering Thermodynamics Wiley & Sons. N V. –1988. – 276p.

9. *Alvarado S., Cherardelli C.* Exergoeconomic Optimization of Cogeneration Plant. Ener-gy, (19 – 12). 1994. – 124p.

10. *Auracher H.* Fundamental Aspects of Energy Application to the Analysis and Optimization of Energy Processes. – 2006. – 165p.

*Получено 11.05.2015*

*Received 11.05.2015*