

УДК 621.036.7

## ПОТЕРИ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ В ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Фялко Н.М., член-кор. НАН Украины, Степанова А.И., канд. техн. наук,  
Навродская Р.А., канд. техн. наук, Пресич Г.А., канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Марии Капнист, 2а, Киев, 03057, Украина

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.2>

Викладено результати дослідження втрат ексергетичної потужності в повітрянонагрівачі теплоутилізаційної системи котельної установки і розглянуто закономірності впливу на зазначені втрати коефіцієнта тепловіддачі від стінки до повітря.

Изложены результаты исследования потерь эксергетической мощности в воздухонагревателе теплоутилизационной системы котельной установки и рассмотрены закономерности влияния на указанные потери коэффициента теплоотдачи от стенки к воздуху.

The results of the study of exergy power losses in the air heater of the heat recovery system of the boiler plant are presented and the patterns of influence on the indicated losses of the heat transfer coefficient from the wall to the air are considered.

Библ. 3, рис. 2, табл. 1.

**Ключевые слова:** эксергетические потери; диссипаторы эксергии; воздухонагреватель.

$G$  – массовый расход теплоносителя;  
 $Q$  – тепловая мощность;  
 $T$  – температура;  
 $T_{cm1}$  ( $T_{cm2}$ ) – температура стенки со стороны дымовых газов (воздуха);  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $\delta$  – толщина стенки;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  
 $\rho$  – плотность.

### Индексы нижние:

дг – дымовые газы;  
воз – воздух;  
ст – стенка.

### Индексы верхние:

сум – суммарный;  
общ – общий.

### Введение

Для децентрализованной энергетики Украины проблема разработки и внедрения эффективных технологий глубокой утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок актуальна как в настоящее время, так и на ближайшую перспективу. Результативность применения таких технологий повышается в случае использования для анализа работы теплоутилизационного оборудования комплексных методик, включающих методы эксергетического анализа в сочетании с другими современными методами исследования. В данных исследованиях использована комплексная методика, которая включает методы эксергетического анализа и методы термодинамики необратимых процессов.

### Анализ литературных данных и постановка проблемы

В настоящее время в мировой практике исследования эффективности энергетических установок различного типа методы эксергетического анализа ис-

пользуются довольно часто [Cziesla F., 2006], [Hajjaji N., 2012]. Однако отсутствие формальных законов использования значительно ограничивает широту их применения [Tsatsaronis G., 2012]. Эксергетические потери являются одной из причин снижения эффективности теплоутилизационных систем и их отдельных элементов. Такие потери связаны с неравновесным теплообменом в системе, процессами теплопроводности, гидродинамическим сопротивлением при движении теплоносителей. В настоящей работе используются методы эксергетического анализа в рамках комплексной методики, включающей также методы термодинамики необратимых процессов. Методика позволяет установить причины возникновения эксергетических потерь и области их локализации в воздухонагревателе теплоутилизационной системы котельной установки, рассчитать указанные потери, проанализировать влияние на них основных параметров воздухонагревателя и и искать возможности снижения потерь путем изменения теплофизических характеристик установки.

**Цель и задачи исследования**

Цель работы – рассчитать потери эксергии, связанные с необратимыми процессами при теплообмене между теплоносителями, с процессами теплопроводности и с гидродинамическим сопротивлением при движении теплоносителей, и определить области параметров воздухонагревателя, в рамках которых обеспечивается минимальный уровень указанных потерь.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

– с использованием комплексной методики, основанной на применении методов эксергетического анализа в сочетании с методами термодинамики необратимых процессов, для воздухонагревателя теплоутилизационной системы котельной установки ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г) установить причины возникновения эксергетических потерь и области их локализации;

– определить потери эксергии, связанные с движением теплоносителей, процессами теплоотдачи и теплопроводности, при различных режимах работы котла и установить вклад каждого типа потерь в суммарные эксергетические потери;

– изучить закономерности влияния на потери эксергии теплофизических параметров воздухонагревателя и определить области параметров воздухонагревателя, в рамках которых обеспечивается минимальный уровень потерь эксергетической мощности.

**Методы исследования**

В работе использовалась комплексная методика исследования эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем, основанная на методах эксергетического анализа и термодинамики необратимых процессов.

**Результаты исследования**

С помощью указанной методики для пластинчатого воздухоподогревателя теплоутилизационной системы котельной установки для котла ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г) определены потери эксергии (диссипаторы эксергии  $R$ ), связанные с процессами теплопередачи  $R^q$  и с гидродинамическим сопротивлением при движении теплоносителей  $R^G$ . В методике использованы следующие основные уравнения:

$$\rho \frac{de}{dt} = -\text{div}(\tau q) + P_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - T_0 q \cdot \text{grad} \frac{1}{T} + \frac{T_0}{T} P_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{dp}{dt}.$$

$$R^q = -T_0 \int_V q_y \frac{d}{dy} \left( \frac{1}{T} \right) dV = -T_0 F \langle q \rangle \int_{y_1}^{y_2} \frac{d}{dy} \left( \frac{1}{T} \right) dy.$$

$$R^G = \frac{T_0}{T} \int_V P_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dV = \frac{T_0}{T} \int_V \left[ \frac{\eta}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \text{div} u \right)^2 + \zeta (\text{div} u)^2 \right] dV.$$

$$q_y = \alpha_{\text{дг}} (T_{\text{дг}} - T_{\text{ст1}});$$

$$q_y = -\lambda_{\text{ст}} (T_{\text{ст1}} - T_{\text{ст2}});$$

$$q_y = \alpha_{\text{воз}} (T_{\text{ст2}} - T_{\text{воз}});$$

$$T_0 \Delta S = T_0 V \Delta p / T_{\text{ср}};$$

$$\Delta p = \xi \rho u^2 / 2.$$

$$R_{\alpha_{\text{дг}}} = \frac{T_0 Q^2}{\alpha_{\text{дг}} F T_{\text{дг}} T_{\text{ст1}}}, R_{\alpha_{\text{воз}}} = \frac{T_0 Q^2}{\alpha_{\text{воз}} F T_{\text{воз}} T_{\text{ст2}}}, R_{\lambda} = \frac{T_0 Q^2 \delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}} F T_{\text{ст1}} T_{\text{ст2}}},$$

$$R_{G_{\text{дг}}} = \frac{(G_{\text{дг}})^3 \xi_{\text{дг}} T_0}{2 T_{\text{дг}} (\rho_{\text{дг}})^2 (F_{\text{дг}})^2}, R_{G_{\text{воз}}} = \frac{(G_{\text{воз}})^3 \xi_{\text{воз}} T_0}{2 T_{\text{воз}} (\rho_{\text{воз}})^2 (F_{\text{воз}})^2}.$$

Результаты расчетов диссипаторов эксергии, общих потерь эксергетической мощности в воздухонагревателе, суммарных потерь, связанных с теплопередачей и движе-

нием теплоносителей, и вклада каждого из диссипаторов в суммарные потери приведены в таблице 1 и на рис. 1,2.

Таблица 1. Результаты расчетов диссипаторов эксергии при различных режимах работы котла

Параметр	Режимы работы котла						
	1	2	3	4	5	6	7
$Q$ , кВт	71,5	59,1	46,3	35,4	52,9	39,5	23,8
$R\alpha_{\text{дл}}$ , кВт	4,96	3,80	2,69	1,86	2,85	1,88	0,91
$R\lambda$ , кВт	0,88	0,61	0,38	0,23	0,49	0,28	0,11
$R\alpha_{\text{воз}}$ , кВт	7,66	5,61	4,05	2,70	4,17	2,66	1,26
$R_{\text{дл}}$ , кВт	0,52	0,37	0,24	0,15	0,49	0,31	0,13
$R_{\text{воз}}$ , кВт	0,28	0,20	0,14	0,09	0,30	0,20	0,08
$K_{R\alpha_{\text{дл}}}$ , %	34,6	35,8	35,8	36,9	34,3	35,25	36,7
$K_{R\lambda}$ , %	6,1	5,8	5,1	4,5	5,9	5,3	4,3
$K_{R\alpha_{\text{воз}}}$ , %	53,5	53,0	54,0	53,7	50,2	49,9	50,4
$K_{R_{\text{дл}}}$ , %	3,6	3,5	3,2	3,0	5,9	5,8	5,2
$K_{R_{\text{воз}}}$ , %	2,0	1,9	1,9	1,8	3,6	3,7	3,3
$R^{\text{сум}}$ , кВт	14,3	10,6	7,5	5,0	8,3	5,3	2,5
$E^{\text{общ}}$ , кВт	16,0	11,9	9,0	5,6	9,0	5,7	2,6

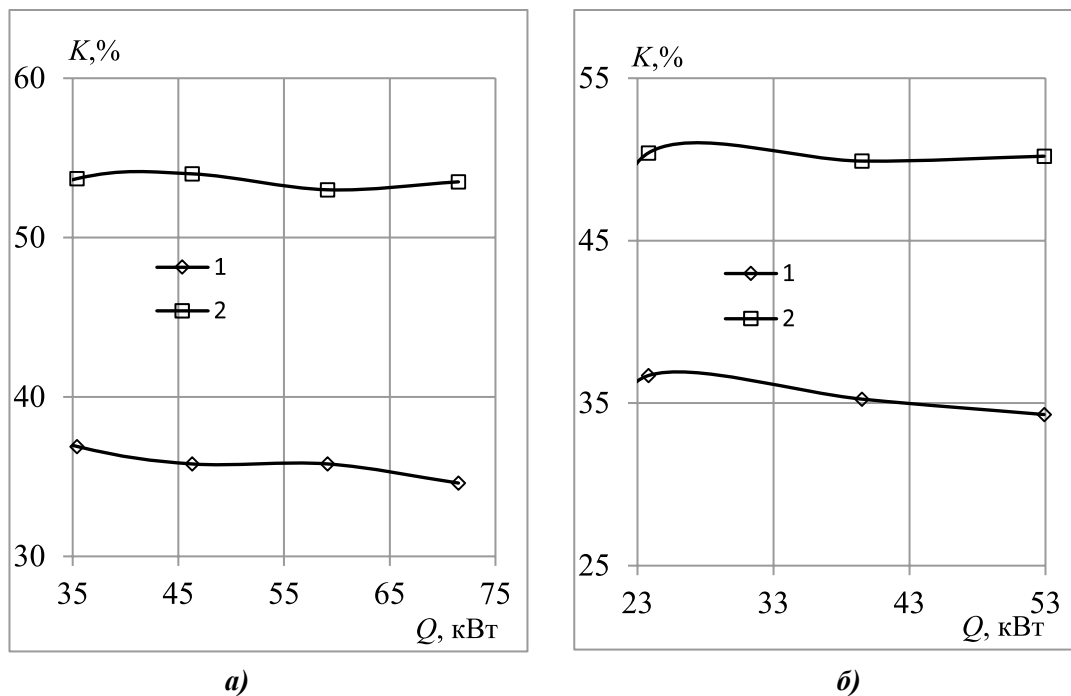


Рис. 1. Зависимость относительного вклада потерь эксергии в суммарные потери от теплопроизводительности котла: а) – режимы 1-4; б) – режимы 5-7; 1 – теплоотдача от дымовых газов к стенке; 2 – теплоотдача от стенки к воздуху.

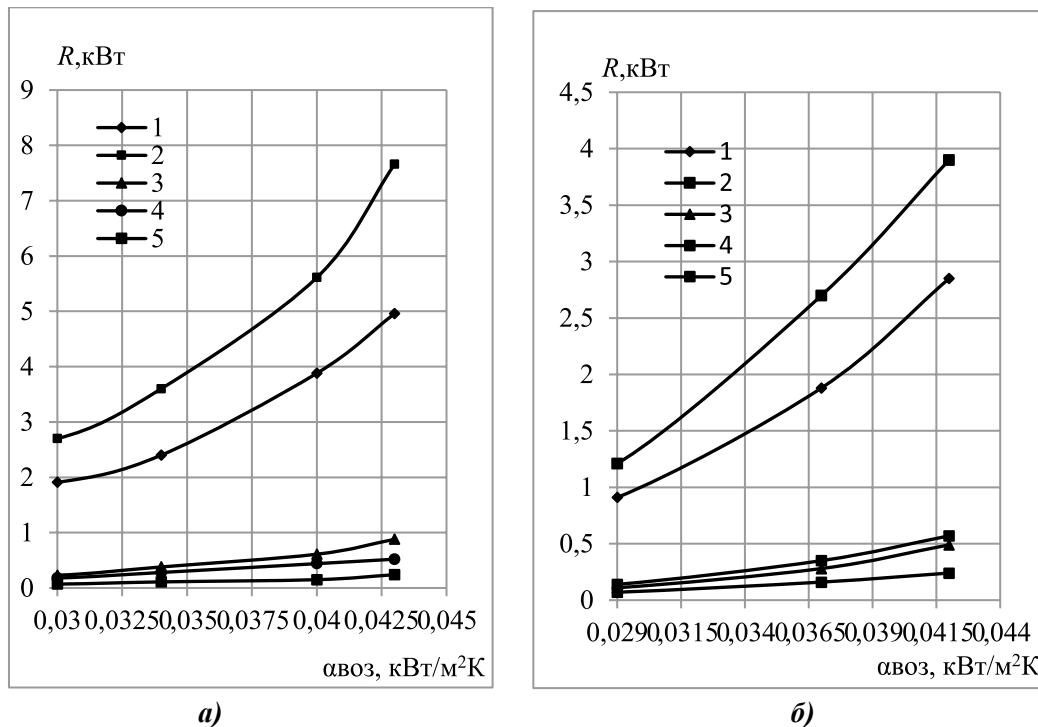


Рис. 2. Зависимость диссипаторов эксергии  $R$  от коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха  $\alpha_{\text{воз}}$ : а) – режимы 1-4; б) – режимы 5-7; 1 –  $R_{\alpha_{\text{ог}}}$ ; 2 –  $R_{\alpha_{\text{воз}}}$ ; 3 –  $R_{\lambda}$ ; 4 –  $R_{G_{\text{ог}}}$ ; 5 –  $R_{G_{\text{воз}}}$ .

Рассматривалось семь режимов работы котла, при этом нагрузка котла изменялась от максимальной до минимальной в соответствии с ее изменением в течение отопительного периода. Как видно из таблицы и рисунков, наибольшие потери эксергетической мощности в воздухонагревателе и наибольший относительный вклад  $K$  в суммарные потери  $R^{\text{сум}}$ , связаны с теплоотдачей от стенки к воздуху, наименьшие потери и вклад связаны с гидродинамическими потерями при движении воздуха. Характер эксергетических потерь остается примерно одинаковым при изменении теплопроизводительности теплоутилизационной установки  $Q$ . Потери эксергетической мощности в воздухонагревателе, характеризующиеся диссипаторами эксергии  $R_{\alpha_{\text{ог}}}$  и  $R_{\alpha_{\text{воз}}}$ , больше (в 5-25 раз) потерь, характеризующихся диссипаторами  $R_{\lambda}$ ,  $R_{G_{\text{ог}}}$ ,  $R_{G_{\text{воз}}}$ , для всех режимов работы котла. С уменьшением теплопроизводительности эксергетические потери, определяемые теплоотдачей от стенки к воздуху и от дымовых газов к стенке, существенно уменьшаются (на 3-5кВт), при этом уменьшение потерь, связанных с теплопроводностью и движением теплоносителей, незначительно. Сравнительный анализ суммарных эксергетических потерь, связанных с процессами теплопередачи и гидродинамическими потерями  $E^{\text{сум}}$ , и общих потерь в воздухонагревателе  $E^{\text{общ}}$  позволил выделить потери

эксергетической мощности, приходящиеся на систему соединительных трубопроводов. Эти потери составили от 4% до 10%. Таким образом, наиболее эффективным для общего снижения потерь эксергетической мощности в воздухонагревателе является снижение потерь, связанных теплоотдачей от стенки к воздуху. Проанализированы закономерности изменения диссипаторов эксергии, связанных с теплоотдачей от стенки к воздуху при изменении коэффициента теплоотдачи. Увеличение коэффициента теплоотдачи от стенки к воздуху приводит к росту эксергетических потерь. Для значений коэффициента теплоотдачи (0,04...0,06) кВт/м<sup>2</sup>К этот рост незначителен, дальнейшее увеличение коэффициента теплоотдачи приводит к более существенному росту потерь. Таким образом, область изменения коэффициента теплоотдачи от стенки к воздуху, в рамках которой обеспечивается минимальный уровень потерь эксергетической мощности, составляет 0,04...0,06 кВт/м<sup>2</sup>К.

#### Выводы

1. Установлены причины возникновения эксергетических потерь и области их локализации в воздухонагревателе теплоутилизационной системы котельной установки.
2. Определен вклад каждого из диссипаторов эксергии и системы соединительных трубопроводов в эксергетические потери.

3. Изучены закономерности влияния на диссипаторы эксергии коэффициента теплоотдачи от стенки к воздуху и определена область его изменения, в рамках которой обеспечивается минимальный уровень эксергетических потерь.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Yuan Yuan Jian, Shao Xiang Zhou.* Exergy Analysis of Boiler Based on the Temperature Gradient // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2010. Paper # 11258018. P. 3-6. doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5449523.

2. *N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodska, N. Meranova, J. Sherenkovskii.* Efficiency of the air heater in a heat recovery system at different thermophysical parameters and operational modes of the boiler // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2018, 6/8 (96). С.43-48.

3. *Tsatsaronis G., Morosuk T.* Advanced thermodynamic (exergetic) analysis // Journal of Physics: Conference Series. 2012. V. 395. 012160. P. 9-12. doi.org / 10.1016 / j.energy.2005.08.001

## LOSSES OF EXERGETIC CAPACITY IN THE AIR HEATER OF THE HEAT-UTILIZATION SYSTEM OF THE BOILER INSTALLATION

**N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodska, G. Presitsh**

*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.2>

The results of the study of the loss of exergic power in the air heater of the heat recovery system of the boiler plant are presented and the patterns of influence on the indicated losses of the heat transfer coefficient from the wall to the air are considered. With the help of a complex method, including methods of exergic analysis and thermodynamics of irreversible processes, the loss of exergy associated with irreversible processes during heat exchange between heat transfer fluids, with heat conduction processes and with hydrodynamic resistance during heat transfer fluids was determined for the plate-type air heater of the heat utilization system of the boiler plant. Seven modes of operation of the boiler were considered, while the load of the boiler changed from maximum to minimum in accordance with its change during the heating period. The greatest exergy power losses in the air heater and the largest relative contribution to the total losses are associated with heat transfer from the wall to the air, the smallest losses and the contribution are associated with hydrodynamic losses during air movement. The nature of the exergy losses remains approximately the same with a change in the heat output of the heat recovery plant. The loss of exergy power in the air heater associated with heat transfer processes, more (5-25 times) losses associated

with thermal conductivity and the movement of coolants, for all modes of operation of the boiler. With a decrease in heat output, the exergy losses, determined by heat transfer from the wall to the air and from the flue gases to the wall, are significantly reduced (by 3-5 kW), while the decrease in losses due to thermal conductivity and the movement of heat carriers is insignificant. The exergy power losses attributable to the connecting piping system are highlighted. These losses ranged from 4% to 10%. Thus, the most effective for the overall reduction of exergy power losses in the stove is to reduce the losses associated with heat transfer from the wall to the air. The laws of influence on exergy dissipators of the heat transfer coefficient from the wall to the air were studied and the range of changes in the specified heat transfer coefficient was determined, within which the minimum level of exergic power losses is ensured.

**Key words:** exergy losses; dissipation of exergy; air heater.

References 3, figures 2, table 1.

1. Yuan Yuan Jian, Shao Xiang Zhou. Exergy Analysis of Boiler Based on the Temperature Gradient // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2010. Paper # 11258018. P. 3-6. doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5449523.

2. N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodska, N. Meranova, J. Sherenkovskii. Efficiency of the air heater in a heat recovery system at different thermophysical parameters and operational modes of the boiler // East European Advanced Technology Journal, 2018, 6/8 (96). P.43-48.

3. Tsatsaronis G., Morosuk T. Advanced thermodynamic (exergetic) analysis // Journal of Physics: Conference Series. 2012. V. 395. 012160. P. 9-12. doi.org / 10.1016 / j.energy.2005.08.001.

*Отримано 10.06.2019*

*Received 10.06.2019*