

**ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕКСЕРГЕТИЧНУ  
ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОВІТРОНАГРІВАЧА ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНОЇ  
СИСТЕМИ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ**

*Н. М. Фіалко, доктор технічних наук, професор, член-кор. НАНУ*

*А. І. Степанова, кандидат технічних наук, провідний науковий  
співробітник*

*Р. О. Навродська, кандидат технічних наук, провідний науковий  
співробітник*

*Н. О. Меранова, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник*

*С. І. Шевчук, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

*Інститут технічної теплофізики НАН України*

*E-mail: [nmfialko@ukr.net](mailto:nmfialko@ukr.net)*

**Анотація.** *Наведено результати аналізу впливу технологічних параметрів на ексергетичну ефективність повітронагрівача теплоутилізаційної системи котельної установки тепловою потужністю 2МВт. Для оцінки ефективності використано комплексну методику, засновану на балансових методах ексергетичного аналізу та виборі необхідних критеріїв оцінки. Цими критеріями обрано ексергетичні втрати і теплоексергетичний критерій ефективності, який характеризує ексергетичні втрати на одиницю теплопродуктивності повітронагрівача. З використанням розробленої методики встановлено характер та закономірності впливу теплопродуктивності пластинчастого повітронагрівача на його ексергетичну ефективність. Досліджено локальні ексергетичні втрати, пов'язані з теплопередачею між теплоносіями, теплопровідністю стінки та рухом теплоносіїв, а також їхній відносний внесок в сумарні локальні ексергетичні втрати. Встановлено, що найбільші ексергетичні втрати та теплоексергетичний критерій ефективності в повітронагрівачі для всіх значень його теплопродуктивності пов'язані з тепловіддачею від стінки до повітря. Значення ексергетичних втрат та теплоексергетичного критерія ефективності при тепловіддачі від димових газів до стінки в 1,4-1,5 разів менше ексергетичних втрат при тепловіддачі від стінки до повітря. Величини ексергетичних втрат та теплоексергетичного критерію ефективності, пов'язаних з теплопровідністю стінки та рухом теплоносіїв, в середньому, на порядок нижчі. Встановлено, що для підвищення ексергетичної ефективності повітронагрівача доцільним є зниження локальних ексергетичних втрат шляхом збільшення коефіцієнтів тепловіддачі, переважно завдяки підвищенню коефіцієнта тепловіддачі від стінки до повітря. Оптимальні значення*

*теплопродуктивності досліджуваного повітрянагрівача, що відповідають його високій ексергетичній ефективності, не перевищують 55кВт.*

**Ключові слова:** *методи ексергетичного аналізу, повітрянагрівач котельної установки, ексергетична ефективність*

**Актуальність.** Результативність застосування технологій утилізації теплоти енергетичних установок підвищується за умов використання для оцінки ексергетичної ефективності теплоутилізаційного обладнання комплексних методик, що базуються на ексергетичному підході та включають вибір необхідних критеріїв оцінки. Критеріями оцінки ексергетичної ефективності теплоутилізаційного обладнання можуть слугувати ексергетичні втрати в його елементах при теплопередачі та русі теплоносіїв або мультиплікативні критерії оцінки ексергетичної ефективності. Комплексні методики дозволяють розрахувати зазначені критерії та проаналізувати вплив на них основних технологічних параметрів теплоутилізаторів. Це дає можливість підвищити ефективність цього обладнання енергетичних установок і розширити сферу застосування методів ексергетичного аналізу. Зважаючи на вищевикладене, наведені у роботі результати дослідження є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У світовій практиці успішно використовуються ексергетичні методи, що дозволяють оцінити термодинамічну досконалість енергетичних установок різного типу [1–8]. Так, у роботі [1] наводяться результати досліджень ексергетичної ефективності паросилової установки з використанням балансових методів ексергетичного аналізу. Стаття [2] присвячена застосуванню методів ексергетичного аналізу для оптимізації систем утилізації теплоти відхідних газів установок цементних заводів. У публікації [3] наведено результати використання балансових методів ексергетичного аналізу для проведення порівняльних досліджень ексергетичних втрат в елементах багатофункціональної будівлі. Показано взаємозв'язок ексергетичних втрат в окремих елементах будівлі та залежність ексергетичних втрат у попередніх елементах від ефективності експлуатації наступних елементів. Використання комплексних підходів до аналізу ексергетичної ефективності енергетичних

установок підвищує результативність досліджень. У роботах [4–8] комплексні методики на основі ексергетичного підходу застосовано для аналізу ексергетичної ефективності і оптимізації теплоутилізаційних систем котельних установок та скловарних печей. Використання методик, побудованих на розрахунку локальних ексергетичних втрат, дозволяє знаходити можливості підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем шляхом зміни теплофізичних характеристик їх окремих елементів. Подальша розробка та застосування комплексних методик для дослідження ексергетичної ефективності теплоутилізаційного обладнання дозволить значно підвищити ефективність енергетичних установок.

**Мета дослідження** – встановити характер та закономірності впливу теплопродуктивності пластинчастого повітрянагрівача систем утилізації теплоти відхідних газів котельної установки на ексергетичну ефективність. Для досягнення зазначеної мети поставлено завдання:

- обґрунтувати вибір критеріїв оцінки ексергетичної ефективності;
- розрахувати локальні ексергетичні втрати і теплоксергетичний критерій ефективності для повітрянагрівача та встановити характер і закономірності впливу на ексергетичні втрати його теплопродуктивності;
- розрахувати відносний внесок ексергетичних втрат, пов'язаних із теплопередачею та рухом теплоносіїв, у загальні ексергетичні втрати за різних значень теплопродуктивності повітрянагрівача.

**Матеріали та методи дослідження.** Проведено дослідження впливу теплопродуктивності теплоутилізатора-повітрянагрівача, призначеного для нагрівання дуттьового повітря шляхом теплоутилізації відхідних газів котельної установки з опалювальним газоспоживальним котлом КСВа-2,0Г, на його ексергетичну ефективність. У рамках комплексної методики дослідження, заснованої на ексергетичному підході, обрано критерії оцінки ексергетичної ефективності пластинчастого повітрянагрівача, що експлуатується протягом опалювального періоду зі зміною температури нагріваного повітря від -20 до

+10°C. Перевірка адекватності отриманих залежностей використаним даним здійснювалася за критерієм Фішера.

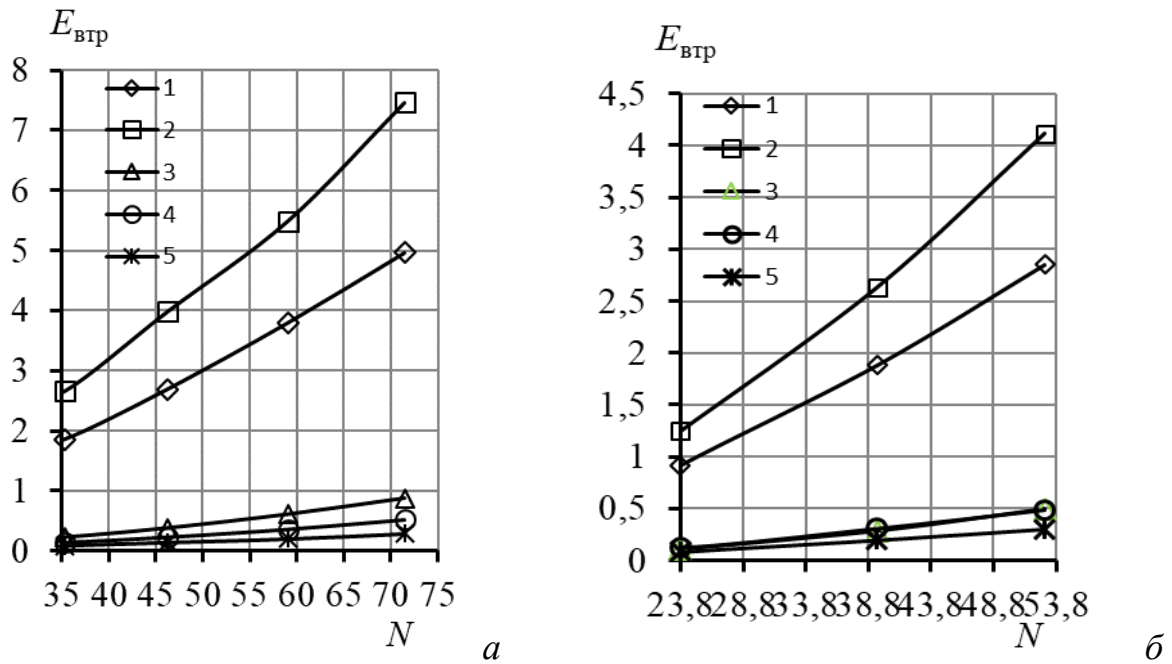
### **Результати досліджень та їх обговорення.**

*Обґрунтування вибору критеріїв оцінки ексергетичної ефективності повітрянагрівача теплоутилізаційної системи котельної установки.*

Для досліджуваного повітрянагрівача теплоутилізаційної системи критеріями оцінки ексергетичної ефективності обрано величину ексергетичних втрат  $E_{\text{втр}}$ , (кВт) та теплоексергетичний критерій ефективності, який характеризує ексергетичні втрати на одиницю теплопродуктивності повітрянагрівача  $E_{\text{втр}}/N$ . Такий вибір критеріїв оцінки ефективності дозволяє виявити в досліджуваному повітрянагрівачі причини ексергетичних втрат, області їх локалізації та розрахувати ці втрати при теплопередачі теплоносіїв, теплопровідності та русі теплоносіїв. Використання вказаних критеріїв дає можливість підвищити ефективність теплоутилізаційної системи котельної установки шляхом зниження певних локальних ексергетичних втрат. Зменшення ексергетичних втрат відповідає збільшенню ексергетичної ефективності повітряогрійних теплоутилізаторів. Втрати ексергії розраховано за допомогою системи матеріальних, енергетичних та ексергетичних балансових рівнянь, що складаються для кожної досліджуваної ситуації.

*Розрахунок локальних ексергетичних втрат і теплоексергетичного критерія ефективності для повітрянагрівача теплоутилізаційної системи котельної установки та встановлення характеру та закономірностей впливу на ексергетичні втрати теплопродуктивності повітрянагрівача.*

Ексергетичні втрати та теплоексергетичний критерій ефективності для розглянутого повітрянагрівача розраховано для різних режимів роботи котла 1–4 та 5–7, що відповідають різним значенням теплопродуктивності повітрянагрівача (рис. 1, табл. 1).



**Рис. 1** Ексергетичні втрати  $E_{втр}$  в повітрянагрівачі теплоутилізаційної системи котельної установки в залежності від теплопродуктивності повітрянагрівача  $N$ :

*a* - режими 1-4; *б* - режими 5-7;

- 1 – ексергетичні втрати при тепловіддачі від димових газів до стінки;
- 2 – втрати при тепловіддачі від стінки до повітря;
- 3 – втрати, пов'язані з теплопровідністю стінки;
- 4 – втрати під час руху димових газів;
- 5 – втрати під час руху повітря

**1. Результати розрахунків теплоексергетичного критерія ефективності за різних значень теплопродуктивності повітрянагрівача**

Параметр	Теплоексергетичні критерії ефективності за різних значень теплопродуктивності повітрянагрівача						
	Режими роботи котла						
	1	2	3	4	5	6	7
$N$ , кВт	35,0	47,0	58,0	72,0	23,8	39,5	52,9
$\varepsilon_{адг}$	0,053	0,060	0,066	0,069	0,042	0,048	0,055
$\varepsilon_{апов}$	0,073	0,086	0,095	0,1	0,053	0,066	0,078
$\varepsilon_{\lambda}$	0,0071	0,0096	0,01	0,0013	0,006	0,0076	0,0095
$\varepsilon_{ГДГ}$	0,0043	0,0053	0,0078	0,0069	0,0063	0,0063	0,0066
$\varepsilon_{Гнов}$	0,0029	0,0031	0,0043	0,0035	0,0042	0,0051	0,0047

Режими роботи котла реалізовувалися в послідовності від максимального до мінімального навантаження котла протягом опалювального періоду. При цьому

враховувалося, що за регламентом, якщо теплове навантаження котельні становить 50 % від номінального, здійснюється переведення відповідної кількості робочих котлів у номінальний режим при зменшенні їх загальної кількості.

Як видно з рисунку 1 та таблиці 1, ексергетичні втрати та теплоексергетичний критерій ефективності лінійно зростають з підвищенням теплопродуктивності повітрянагрівача. Темп зростання для ексергетичних втрат, пов'язаних з тепловіддачею від стінки до повітря, значно вищий, ніж для втрат, пов'язаних з теплопровідністю стінки та рухом теплоносіїв. Так, тангенс кута нахилу до вісі абсцис кривих залежності ексергетичних втрат від теплопродуктивності повітрянагрівача при тепловіддачі, в середньому в 15 разів більший, ніж при теплопровідності стінки та русі теплоносіїв. Починаючи зі значень теплопродуктивності 55 кВт темп зростання ексергетичних втрат, пов'язаних з тепловіддачею від стінки до повітря, дещо збільшується. Найбільші ексергетичні втрати для всіх значень теплопродуктивності повітрянагрівача пов'язані з тепловіддачею від стінки до повітря. Значення ексергетичних втрат та теплоексергетичного критерію ефективності при тепловіддачі від димових газів до стінки в 1,4–1,5 разів менше ексергетичних втрат при тепловіддачі від стінки до повітря. Значення ексергетичних втрати та теплоексергетичного критерія ефективності, пов'язаних з теплопровідністю стінки та рухом теплоносіїв, в середньому, на порядок нижчі.

*Розрахунок відносного внеску ексергетичних втрат, пов'язаних із теплопередачею та рухом теплоносіїв, в загальні локальні ексергетичні втрати за різних значень теплопродуктивності повітрянагрівача.*

Розраховано відносний внесок ексергетичних втрат, пов'язаних із тепловіддачею  $K_{\text{адг}}$ ,  $K_{\text{опов}}$ , теплопровідністю  $K_{\lambda}$  та рухом теплоносіїв  $K_{\text{Гдг}}$ ,  $K_{\text{Гнов}}$  в загальні локальні ексергетичні втрати за різних значень теплопродуктивності повітрянагрівача (табл. 2).

Найбільший відносний внесок локальних ексергетичних втрат при всіх значеннях теплопродуктивності повітрянагрівача пов'язаний з тепловіддачею від стінки до повітря. Значення відносного внеску локальних ексергетичних втрат,

пов'язаних з теплопровідністю стінки, на порядок нижчі. Ще менший відносний внесок, пов'язаний з локальними ексергетичними втратами внаслідок руху теплоносіїв.

## 2. Результати розрахунків відносного внеску локальних ексергетичних втрат за різних значень теплопродуктивності повітрянагрівача

Параметр	Відносний внесок локальних ексергетичних втрат за різних значень теплопродуктивності повітрянагрівача						
	Режими роботи котла						
	1	2	3	4	5	6	7
$N$ , кВт	35,0	47,0	58,0	72,0	23,8	39,5	52,9
$K_{\text{одг}}$ , %	37,8	36,4	36,2	35,3	36,5	36,2	35,6
$K_{\text{опов}}$ , %	52,0	52,7	51,6	53,1	48,1	49,5	50,9
$K_{\lambda}$ , %	5,1	5,8	5,6	6,4	5,8	5,7	6,1
$K_{\text{ГДГ}}$ , %	3,1	3,2	4,3	3,5	5,8	4,8	4,3
$K_{\text{Гнов}}$ , %	2,0	1,9	2,3	1,7	3,8	3,8	3,1

Отже, для підвищення ексергетичної ефективності повітрянагрівача доцільним є зниження локальних ексергетичних втрат завдяки збільшенню коефіцієнтів тепловіддачі, переважно шляхом підвищення коефіцієнта тепловіддачі від стінки до повітря. Оптимальні значення теплопродуктивності повітрянагрівача, що відповідають його високій ексергетичній ефективності, не перевищують 55 кВт.

**Наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.** Наукова новизна та практична цінність отриманих результатів полягає у встановленні закономірностей впливу технологічних параметрів на ексергетичну ефективність повітрянагрівача теплоутилізаційних систем котельної установки та визначенні області технологічних параметрів повітрянагрівачів, у межах яких забезпечується найбільший рівень ексергетичної ефективності.

### Висновки та перспективи.

1. Обрано критерії оцінки ексергетичної ефективності повітрянагрівача теплоутилізаційної системи опалювальної котельної установки.

2. Розраховано локальні ексергетичні втрати, пов'язані з теплопередачею і рухом теплоносіїв, теплоксергетичний критерій ефективності та відносний внесок

локальних ексергетичних втрат в сумарні локальні ексергетичні втрати. Встановлено характер та закономірності впливу на ексергетичні втрати теплопродуктивності повітрянагрівача.

3. Показано, що для підвищення ексергетичної ефективності повітрянагрівача доцільним є зниження локальних ексергетичних втрат за рахунок зміни коефіцієнтів тепловіддачі, переважно шляхом збільшення коефіцієнта тепловіддачі від стінки до повітря. Оптимальні значення теплопродуктивності повітрянагрівача не перевищують 55 кВт.

### Список використаних джерел

1. Igor Poljak, Josip Orović, Vedran Mrzljak. Energy and Exergy Analysis of the Condensate Pump During Internal Leakage from the Marine Steam Propulsion System. *Scientific Journal of Maritime Research*. 2018. No 32. P. 268–280. <https://doi.org/10.31217/p.31.2.12>
2. Mohammadi, M. Ali Ashjari, A. Sadreddini. Exergy analysis and optimisation of waste heat recovery systems for cement plants. *International Journal of Solar Energy*. 2018. Vol. 37. P. 115–133. <https://doi.org/10.1080/14786451.2016.1181067>
3. Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T. Splitting the dynamic exergy destruction within a building energy system in-to endogenous and exogenous parts using measured data from the building automation system. *International Journal of Energy Research*. 2020, Vol. 44, No. 1. P. 1–16. <http://dx.doi.org/10.1002/er.5213>
4. Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Meranova N., Sherenkovskii J. 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. Vol 6, No 8 (96). P. 43–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147526>
5. Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Novakovskiy M. Study of the efficiency of a combined heat utilization system using the graph theory methods. *International scientific journal "Internauka"*. 2019. No 15 (1). P. 61–63. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-15>
6. Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Presich G. Localization of exergy losses in the air heater of the heat-recovery system under different boiler operating modes. *International scientific journal "Internauka"*. 2019. No 12 (74). P. 30–33. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-12>
7. Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Shevchuk S. Comparative analysis of exergetic efficiency of methods of protection of gas exhaust tracks of boiler installations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. No 8(111). P.42–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.234026>
8. Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Gnedash G., Shevchuk S. Complex methods for analysis of efficiency and optimization of heat-recovery system. *Scientific and innovation*. 2021. Vol. 17, No 4. P. 11–18. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.011>



## References

1. Igor Poljak, Josip Orović, & Vedran Mrzljak. (2018). Energy and Exergy Analysis of the Condensate Pump During Internal Leakage from the Marine Steam Propulsion System. *Scientific Journal of Maritime Research*, 32, 268–280. <https://doi.org/10.31217/p.31.2.12>
2. Mohammadi, M. Ali Ashjari, & A. Sadreddini. (2018). Exergy analysis and optimization of waste heat recovery systems for cement plants. *International Journal of Solar Energy*, 37. 115–133. <https://doi.org/10.1080/14786451.2016.1181067>
3. Sayadi, S., Tsatsaronis, G., & Morosuk, T. (2020). Splitting the dynamic exergy destruction within a building energy system in-to endogenous and exogenous parts using measured data from the building automation system. *International Journal of Energy Research*, 44 (1), 1–16. <http://dx.doi.org/10.1002/er.5213>
4. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., Meranova, N., & Sherenkovskii, Y. (2018). Efficiency of the air heater in a heat recovery system at different thermophysical parameters and operational modes of the boiler. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/8 (96), 43–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147526>
5. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., & Novakovsky, M. (2019). Study of the efficiency of a combined heat utilization system using the graph theory methods. *International scientific journal "Internauka"*, 15 (1), 61–63. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-15>
6. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., & Presich G. (2019). Localization of exergy losses in the air heater of the heat-recovery system under different boiler operating modes. *International scientific journal "Internauka"*, 12(74), 30–33. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-12>
7. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., & Shevchuk, S. (2021). Comparative analysis of exergetic efficiency of methods of protection of gas exhaust tracks of boiler installations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 8(111). 42–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.234026>
8. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., Gnedash, G., & Shevchuk, S. (2021). Complex methods for analysis of efficiency and optimization of heat-recovery systems. *Science and Innovation*, 17(4), 11–18. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.011>

## INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE AIR HEATER EXERGY EFFICIENCY OF THE HEAT RECOVERY SYSTEM BOILER PLANT

*N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodska, N. Meranova, S. Shevchuk*

**Abstract.** *The analysis results of the technological parameters influence on the air heater exergetic efficiency of the heat recovery system a boiler plant with a heating capacity of 2 MW are presented. A comprehensive methodology based on the balance methods of exergetic analysis and the selection of the necessary evaluation criteria was used to evaluate the efficiency. Exergetic losses and heat-exergetic efficiency criterion, which characterizes exergetic losses per unit of heat output of the air heater, were chosen as these criteria. Using the developed methodology, the nature and regularities of the heating capacity the plate air heater influence on its exergetic efficiency were established.*

*The local exergetic losses associated with heat transfer between heat-transfer agents, wall thermal conductivity, and heat-transfer agents motion, as well as their relative contribution to the total local exergetic losses, are investigated. It was established that the largest exergetic losses and the heat-exergetic efficiency criterion in the air heater for all values of its heat output are related with heat transfer from the wall to the air. The values of exergetic losses and the heat-exergy efficiency criterion for heat transfer from flue gases to the wall are 1.4-1.5 times less than the exergetic losses for heat transfer from the wall to the air. The values of exergetic losses and the heat-exergy efficiency criterion related with wall thermal conductivity and heat-transfer agents movement are, on average, an order of magnitude lower. It was established that to increase the air heater exergetic efficiency, it is advisable to reduce local exergetic losses by increasing the heat transfer coefficients, mainly by increasing the heat transfer coefficient from the wall to the air. The optimal values heating capacity of the air heater studied, which corresponds to its high exergetic efficiency, does not exceed 55 kW.*

**Key words:** *exergy analysis methods, air heater of boiler plant, exergy efficiency*