

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕКСЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

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. Мєранова, 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

Анотація. *Необхідність забезпечення ефективної роботи теплоутилізаційних систем енергетичних установок визначає важливість та актуальність досліджень, що проводяться в цій галузі. Метою роботи є підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем різного призначення. Наводяться результати розв'язування завдань, необхідних для досягнення поставленої мети:*

- надати теплоутилізаційні системи різного призначення у вигляді структурних схем з ідентифікацією ексергетичних потоків теплоносіїв;*
- обрати ексергетичні критерії оцінки ефективності для теплоутилізаційних систем різного призначення, розрахувати їх значення та провести порівняльний аналіз;*
- розробити рекомендації щодо використання теплоутилізаційних систем різного призначення з урахуванням особливостей їх застосування.*

Для досліджень використано комплексну методику, що поєднує структурно-варіантні методи ексергетичного аналізу з методами представлення ексергетичних балансів у матричній формі. Розглядалися три типи теплоутилізаційних систем з різною кількістю теплоносіїв для споживання утилізованої теплоти. Розроблено структурні схеми теплоутилізаційних систем різного призначення з ідентифікацією ексергетичних потоків теплоносіїв між окремими дискретними елементами. Критеріями оцінювання ексергетичної ефективності обрано ексергетичні втрати, теплоексергетичний критерій та ексергетичний ККД. Одержано їх значення для теплоутилізаційних систем та їх елементів за різних величин відносної потужності котла. Найбільші ексергетичні втрати відбуваються у водогрійному теплоутилізаторі, димососі та насосній системі, найменші – у повітрогрійному теплоутилізаторі та газопідігрівачі. Підвищення відносної потужності котла призводить до збільшення відносного внеску ексергетичних втрат водогрійного теплоутилізатора, а також насосної системи і системи трубопроводів в сумарні ексергетичні втрати у

теплоутилізаційній системі. Встановлено, що збільшення кількості теплоносіїв у теплоутилізаційній системі та використання раціональних шляхів зниження загальних ексергетичних втрат підвищує ефективність теплоутилізаційних систем. Подальші розробки в цій галузі дозволять забезпечити підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем різного призначення.

Ключові слова: *теплоутилізаційні системи; критерії ефективності; ексергетична ефективність*

Актуальність. В останні роки за наявності в країні екологічних проблем та проблем підвищення вартості палива велика увага у сфері теплоенергетики приділяється розробці, дослідженню та впровадженню ефективних технологій утилізації теплоти. Рішення щодо доцільності реалізації тієї чи іншої утилізаційної схеми має базуватися на всебічних дослідженнях, які потребують застосування поряд із класичними сучасними термодинамічними методами методів ексергетичного аналізу. Комплексні методики, засновані на ексергетичному підході, дозволяють намітити шляхи зниження ексергетичних втрат у теплоутилізаційних системах та підвищення таким чином їх ексергетичної ефективності. В Україні існує досить високий потенціал для впровадження вискоефективних технологій утилізації теплоти, що визначає важливість та актуальність досліджень, що проводяться в цій галузі.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. Наразі все більше поширення у світі при дослідженні ефективності енергетичних установок різного призначення посідають методики на основі ексергетичного підходу. Так, у роботі [1] оцінку ефективності елементів енергетичних установок за різних температур навколишнього середовища проведено із використанням ексергетичних методів дослідження. У роботі [2] методи ексергетичного аналізу використовуються для оцінки ексергетичних втрат в елементах системи опалення та гарячого водопостачання будівлі від конденсаційного котла. У роботі [3] для встановлення зв'язку ексергетичних втрат в елементах багатофункціональної будівлі використано балансові методи ексергетичного аналізу. У роботі [4] представлено результати ексергетичних досліджень системи газифікації вугілля, розробленої для виробництва водню та електроенергії. У роботах [5-10] комплексні методики на

основі ексергетичного підходу використовуються при дослідженні систем утилізації теплоти енергетичних установок. Необхідність розширення вказаних досліджень визначається існуючими проблемами забезпечення вискоефективної роботи теплоутилізаційних систем різного призначення. Їх розв'язання дозволить визначити шляхи підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем та отримати необхідну інформацію для проектування оптимальних теплоутилізаційних схем.

Мета дослідження – підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем різного призначення.

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

- представити теплоутилізаційні системи різного призначення у вигляді структурних схем з ідентифікацією ексергетичних потоків теплоносіїв;
- обрати ексергетичні критерії оцінки ефективності для теплоутилізаційних систем різного призначення, розрахувати їх значення та провести порівняльний аналіз;
- розробити рекомендації щодо використання теплоутилізаційних систем різного призначення з урахуванням особливостей їх застосування.

Матеріали та методи дослідження.

У роботі розглянуто ексергетичну ефективність теплоутилізаційних систем різного призначення газоспоживальної котельної установки, теплопродуктивністю 2 МВт. Для досліджень використано комплексну методику, що поєднує структурно-варіантні методи ексергетичного аналізу з методами представлення ексергетичних балансів у матричній формі.

Результати досліджень та їх обговорення.

Представлення теплоутилізаційних систем різного призначення у вигляді структурних схем з ідентифікацією ексергетичних потоків теплоносіїв

Розглядалися три типи теплоутилізаційних систем: теплоутилізаційна система, призначена для нагрівання тепломережної води, комбінована теплоутилізаційна система, призначена для нагрівання тепломережної води та нагрівання і зволоження дуттьового повітря, та комбінована теплоутилізаційна система, призначена для

підігрівання води та дуттьового повітря. У першому випадку основним елементом системи теплоутилізації є поверхневий теплоутилізатор конденсаційного типу. Теплоутилізатор виконаний у вигляді приставки до котла і включає теплообмінник та нейтралізатор конденсату. У другому випадку в теплоутилізаційній схемі використано контактнo-поверхневий водопідігрівач, контактний підігрівач повітря і водопідігрівач. Основні елементи теплоутилізаційної системи третього типу – водогрійний та повітрогрійний теплоутилізатори. Перший використовується як додаткова конвективна частина котла, а другий - як повітропідігрівач котлоагрегату. Розроблено структурні схеми теплоутилізаційних систем різного призначення з ідентифікацією ексергетичних потоків теплоносіїв між окремими дискретними елементами простої структури (рис. 1–3). Розрахунок ексергетичних характеристик теплоутилізаційних систем та їхніх окремих елементів проведено за методом чорної скриньки із використанням вхідних та вихідних термодинамічних параметрів теплоносіїв ексергетичних потоків між окремими елементами системи. Як приклад наведено значення основних термодинамічних параметрів теплоносіїв для комбінованої теплоутилізаційної системи, призначеної для підігрівання води та дуттьового повітря (табл. 1).

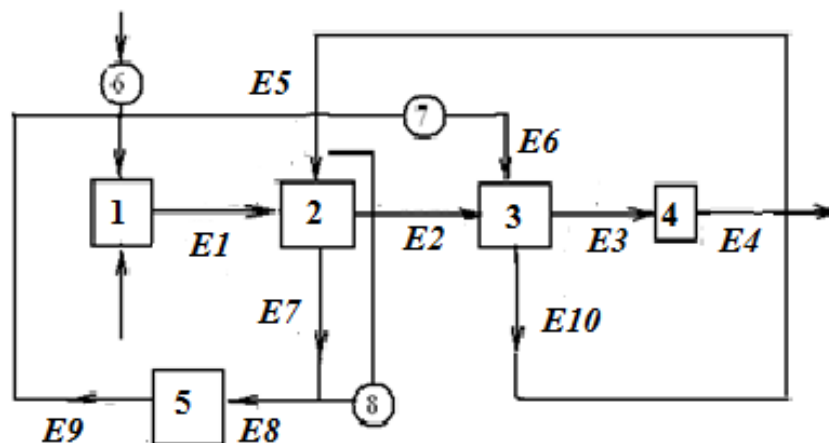


Рис. 1. Структурна схема котельної установки з теплоутилізаційною системою для нагрівання тепломережної води з позначенням ексергетичних потоків теплоносіїв $E1 - E10$:

1 – пальник; 2 – котел; 3 – водонагрівач; 4 – димосос; 5 – споживач теплоти; 6 – вентилятор; 6-8 – насоси; $E1 - E4$ – димові гази;
 $E5 - E10$ – вода

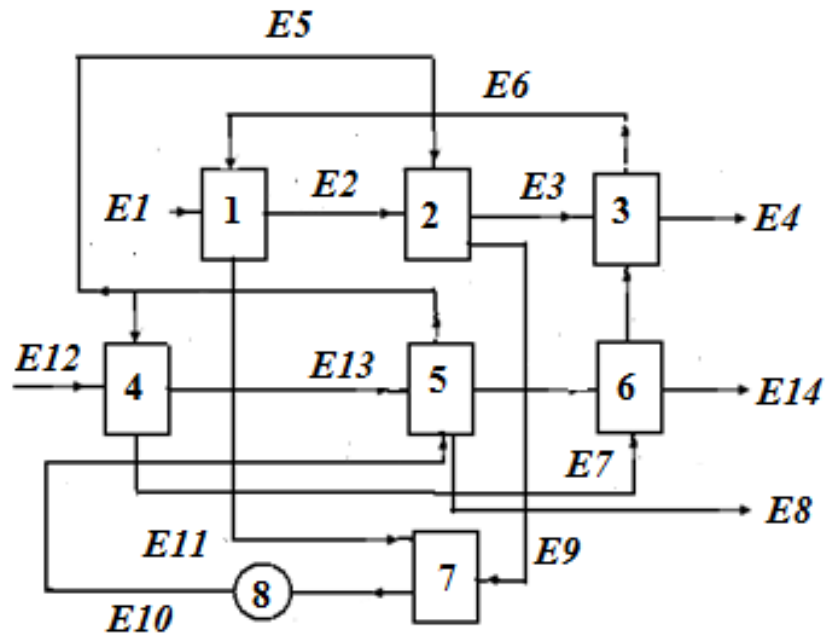


Рис. 2. Структурна схема комбінованої теплоутилізаційної системи для підігрівання та зволоження дуттьового повітря з позначенням ексергетичних потоків теплоносіїв $E1 - E14$:

1 – повітрянагрівач; 2 – контактний підігрівач та зволожувач повітря; 3 – повітропідігрівач; 4 – вододогрівач; 5 – поверхневий водопідігрівач; 6 – газопідігрівач; 7 – водозбірник; 8 – насос;
 $E1 - E4$ – повітря; $E5 - E11$ – вода; $E12 - E14$ – димові гази

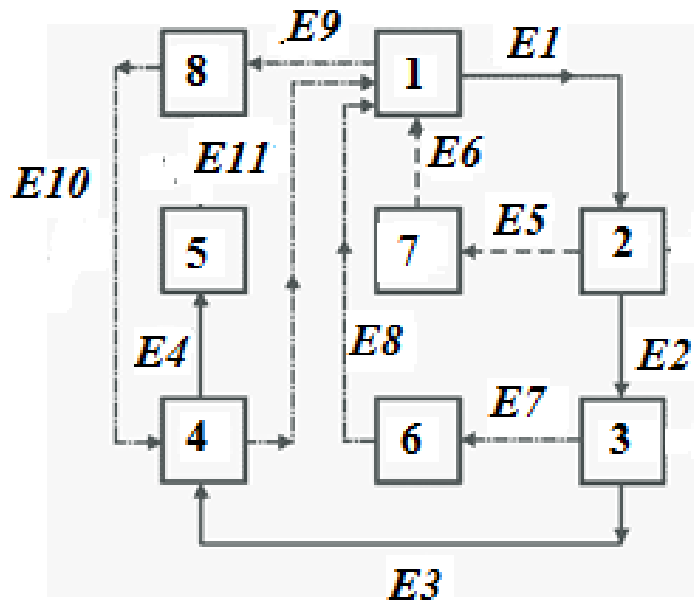


Рис. 3. Структурна схема комбінованої теплоутилізаційної системи для підігрівання води та дуттьового повітря з позначенням ексергетичних потоків теплоносіїв $E1 - E14$:

1 – котел; 2, 3 – водогрійний та повітрогрійний теплоутилізатори;
 4 – газопідігрівач; 5 – димосос; 6 – вентилятор; 7, 8 – насоси; $E1 - E4$ – димові гази; $E5, E6, E9 - E11$ – вода; $E7, E8$ – повітря

1. Термодинамічні параметри ексергетичних потоків теплоносіїв у комбінованій теплоутилізаційній системі для підігрівання води та дуттьового повітря

Ексергетичні потоки теплоносіїв	Основні термодинамічні параметри ексергетичних потоків теплоносіїв при значеннях відносної потужності котла $N = 50 \%$			
	$T, ^\circ\text{C}$	$C_p, \text{кДж/кг грд}$	$G, \text{кг/с}$	$P, \text{бар}$
E_1	117,5	1,07	0,48	0,998
E_2	58,5	1,06	0,48	0,995
E_3	45,5	1,06	0,48	0,994
E_4	53,5	1,06	0,48	0,992
E_5	55,0	4,18	10,58	9,99
E_6	55,0	4,18	10,58	10,0
E_7	14,5	1,04	0,44	0,998
E_8	14,0	1,04	0,44	0,998
E_9	80,5	4,20	10,58	10,0
E_{10}	80,5	4,20	0,30	12,0
E_{11}	77,5	4,19	0,30	10,0

Вибір ексергетичних критеріїв оцінки ефективності для теплоутилізаційних систем різного призначення, розрахунок їх значень та проведення порівняльного аналізу.

У рамках комплексної методики, яка використовується для дослідження ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем, вибрано критерії оцінки ексергетичної ефективності. Це ексергетичні втрати $E_{\text{втр}}$, теплоксергетичний критерій ефективності, що визначає втрати ексергії на одиницю теплопродуктивності $\varepsilon = E_{\text{втр}}/Q$, а також ексергетичний ККД η_{ex} . Результати розрахунку енергетичних характеристик представлено в табл. 2.

Для встановлення елементів теплоутилізаційної системи з найбільшими ексергетичними втратами розраховано ексергетичні втрати у всіх елементах теплоутилізаційних систем за кількох режимів роботи котла. Як приклад наведено результати розрахунку для комбінованої теплоутилізаційної системи, призначеної для підігрівання води та дуттьового повітря (табл. 3).

2. Результати розрахунку ексергетичних критеріїв ефективності для теплоутилізаційних систем різного призначення

Системи теплоутилізації різного призначення	ϵ	$\eta_{ex}, \%$
Теплоутилізаційна система, призначена для нагрівання тепломережної води	0,563	24,7
Комбінована теплоутилізаційна система, призначена для нагрівання тепломережної води та нагрівання та зволоження дуттьового повітря	0,221	32,5
Комбінована теплоутилізаційна система, призначена для підігрівання води та дуттьового повітря	0,154	37,8

3. Ексергетичні втрати в елементах комбінованої теплоутилізаційної системи для підігрівання води та дуттьового повітря

№	Елементи теплоутилізаційної системи	Ексергетичні втрати, кВт			
		Відносна потужність котла $N, \%$			
		30	50	70	90
1	Теплоутилізаційна система	6,0	8,0	17,5	33,5
2	Водогрійний теплоутилізатор	1,0	1,4	3,5	15,0
3	Повітрогрійний теплоутилізатор	1,0	1,3	1,4	2,1
4	Газопідігрівач	1,0	0,3	0,5	0,9
5	Димосос	1,0	2,3	4,1	6,1
6	Вентилятор	0,4	0,8	1,5	2,6
7	Насосна система	1,1	1,3	3,2	3,4
8	Система трубопроводів	0,5	0,6	3,3	3,4

Розробка рекомендацій щодо використання теплоутилізаційних систем різного призначення з урахуванням особливостей їх застосування.

Для комбінованих теплоутилізаційних систем, в яких кількість споживачів утилізованої теплоти збільшується, а саме, утилізована теплота використовується не тільки для підігрівання води, а також і для підігрівання та зволоження дуттьового повітря, значення теплоексергетичного критерія ефективності знижується, а ексергетичного ККД підвищується (табл. 2). Як видно з таблиці 3, найбільші ексергетичні втрати при всіх значеннях потужності котла відбуваються у водогрійному теплоутилізаторі, димососі та насосній системі, найменші – у повітрогрійному теплоутилізаторі та газопідігрівачі. Зі збільшенням відносної потужності котла до 90% відносний внесок ексергетичних втрат водогрійного теплоутилізатора в сумарні ексергетичні втрати у теплоутилізаційній системі зростає до 45 %, а насосної системи і системи трубопроводів – до 20 %.

Раціональним шляхом зниження загальних ексергетичних втрат у теплоутилізаційній системі є їх зниження в насосній системі та системі трубопроводів. Таке рішення забезпечує, крім зниження ексергетичних, теплових та енергетичних втрат, збільшення компактності та зменшення металоємності теплоутилізаційної установки. Таким чином збільшення кількості споживачів утилізованої теплоти у теплоутилізаційній системі та використання раціональних шляхів зниження загальних ексергетичних втрат підвищує ефективність теплоутилізаційних систем різного призначення. Такі висновки корелюються з результатами дослідження енергетичної ефективності теплоутилізаційних систем: тепловий ККД котельної установки при застосуванні комбінованих теплоутилізаційних систем з глибокою утилізацією теплоти підвищується в середньому на 5%, коефіцієнт використання теплоти палива – на 7%. Крім того, внаслідок зменшення витрат палива, розчинення в конденсаті шкідливих речовин, зниження температури в топці котла при подачі в неї підігрітого та насиченого водяною парою повітря такі теплоутилізаційні системи характеризуються підвищеною екологічною безпекою. Вибір оптимальної схеми використання утилізованої теплоти визначається, поряд із перерахованими показниками підвищення ефективності, також потребою у певному виді теплоносія, вартістю палива, можливістю використання ефективних поверхонь нагріву тощо.

Наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Наукова новизна та практична цінність отриманих результатів полягає в аналізі ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем різного призначення та у розробці рекомендацій щодо їх застосування.

Висновки та перспективи.

1. Представлено теплоутилізаційні системи різного призначення у вигляді структурних схем з ідентифікацією ексергетичних потоків теплоносіїв.
2. Обрано ексергетичні критерії оцінки ефективності для теплоутилізаційних систем різного призначення, розраховано їх значення та проведено порівняльний аналіз.
3. Розроблено рекомендації щодо використання теплоутилізаційних систем

різного призначення з урахуванням особливостей їх застосування.

Список використаних джерел

1. Zare V., Moalemi A. Parabolic trough solar collectors integrated with a Kalina cycle for high temperature applications. Energy, exergy and economic analyses. Energy Conversion and Management. 2017. 151. 681-692. [Link] [DOI:10.1016/j.enconman.2017.09.028].
2. Picallo-Perez A., Sala J. M., Tsatsaronis G., Sayadi S. "Advanced Exergy Analysis in the Dynamic Framework for Assessing Building Thermal Systems", Entropy, 2019. vol. 22, no. 1, Dec., p. 32, doi: 10.3390/e22010032.
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", Int. J. Energy Res. 2020, vol. 44, no. 6, Feb., pp. 4395–4410, doi: 10.1002/er.5213.
4. Seyitoglu S.S., Dincer I., Kilicarslan A. Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification. International Journal of Hydrogen Energy. 2017. № 42. P.2600.
5. 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. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. 6/8 (96). P. 43-48. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.147526.
6. Stepanova, A. Analiz rabotosposobnosti ustanovki s kombinirovannoy teploutilizatsionnoy sistemoy dlia podogreva vody i dutevogo vozdukh kotloagregata [Analysis of the application combined heat recovery systems for water heating and blast air of the boiler unit]. Industrial Heat Engineering, 2016. 38(4). 38-46. DOI: https://doi.org/10.31472/ihe.4.2016.06.
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. 3/8 (111). 2021. P.42-49. Doi 10.15587/1729.4061.2021/234026 ISSN 1729-3774 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. 17(4). P.11-18. Doi.org/ 10.15407/scine17.04.011.
9. Fialko N., Stepanova A., Navrodska R. Study of the efficiency of a combined heat utilization system using the graph theory methods. International scientific journal "Internauka". 2019. №15(1). C.61-63.
10. 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. №12(74). P.30-33.

References

1. Zare, V., Moalemi, A. (2017). Parabolic trough solar collectors integrated with a Kalina cycle for high temperature applications. Energy, exergy and economic analyses.

Energy Conversion and Management.2017.151.681-692. [Link]
[DOI:10.1016/j.enconman.2017.09.028].

2. Picallo-Perez, A., Sala, J. M., Tsatsaronis, G., Sayadi, S. (2019). Advanced Exergy Analysis in the Dynamic Framework for Assessing Building Thermal Systems, Entropy, vol. 22, no. 1, Dec., p. 32, doi: 10.3390/e22010032.

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", Int. J. Energy Res. vol. 44, no. 6, Feb., pp. 4395–4410, doi: 10.1002/er.5213.

4. Seyitoglu, S.S., Dincer, I., Kilicarslan, A. (2017). Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification. International Journal of Hydrogen Energy. № 42. P.2600.

5. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., Meranova, N., Sherenkovskii, J. (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). P. 43-48. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.147526.

6. Stepanova, A. (2016). Analiz rabotosposobnosti ustanovki s kombinirovannoy teploutilizatsionnoy sistemoy dlia podogreva vody i dutevogo vozdukhа kotloagregata [Analysis of the application combined heat recovery systems for water heating and blast air of the boiler unit]. Industrial Heat Engineering, 38(4), 38-46. DOI: <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2016.06>.

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. 3/8 (111). P.42-49. Doi 1015587/1729. 4061.2021/234026 ISSN 1729-3774 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 system. Scientific and innovation. 17(4). P.11-18. Doi.org/ 10.15407/scine17.04.011

9. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R. (2019). Study of the efficiency of a combined heat utilization system using the graph theory methods. International scientific journal "Internauka". №15(1). P.61-63.

10. 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). P.30-33.

COMPARATIVE ANALYSIS OF EXERGETIC EFFICIENCY OF HEAT RECOVERY SYSTEMS OF BOILER PLANTS

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

Abstract. *The paper presents the results of a comparative analysis of the exergetic efficiency of heat recovery systems of boiler plants. The need to ensure the efficient operation of heat recovery systems for various purposes determines the importance and relevance of research conducted in this field. The purpose of the work is to increase the exergetic efficiency of heat recovery systems of various purposes. The results of solving the tasks necessary to achieve the set goal are given:*

- submit heat utilization systems of various purposes in the form of structural diagrams with the identification of exergetic flows of heat carriers;
- choose exergetic efficiency evaluation criteria for heat recovery systems of various purposes, calculate their values and conduct a comparative analysis;
- develop recommendations for the use of heat recovery systems for various purposes, taking into account the specifics of their application.

For research, a complex methodology was used, which combines structural-variant methods of exergetic analysis with methods of presenting exergetic balances in matrix form. Three types of heat recovery systems with different numbers of consumers of recovered heat were considered. Structural diagrams of heat recovery systems of various purposes with identification of exergetic flows of heat carriers between individual discrete elements have been developed. Exergetic losses, thermal exergetic criterion and exergetic efficiency were selected as criteria for evaluating exergetic efficiency. Their values were obtained for heat recovery systems and their elements at different values of the relative power of the boiler. The largest exergy losses occur in the water-heating heat exchanger, smoke extractor and pumping system, the smallest - in the air-heating heat exchanger and gas heater. An increase in the relative power of the boiler leads to an increase in the relative contribution of the exergy losses of the water heating heat recovery system, as well as the pumping system and the pipeline system to the total exergy losses in the heat recovery system. It has been established that increasing the number of consumers of recovered heat in the heat recovery system and using rational ways of reducing total exergy losses increases the efficiency of heat recovery systems. Further developments in this field will allow to increase the exergetic efficiency of heat recovery systems for various purposes.

Key words: *heat recovery systems; performance criteria; exergetic efficiency*