УДК 621.036.7

ЕКСЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УТИЛІЗАТОРА ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ТЕПЛОВОГО ДВИГУНА КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

Фіалко Н.М., член-кореспондент НАН України, **Степанова А.І.**, канд. техн. наук,
Навродська Р.О., канд. техн. наук, **Шевчук С.І.**, канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. М. Канніст, 2а, Київ, 03680, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.6>

Представлено результати дослідження ефективності утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки. Аналізуються можливості використання для цієї мети дискретно-модульного принципу та комплексних методик аналізу ефективності.

Представлены результаты исследования эффективности утилизатора теплоты отходящих газов теплового двигателя когенерационной установки. Анализируются возможности использования для этой цели дискретно-модульного принципа и комплексных методик анализа эффективности.

The paper presents the results of a study of the efficiency of a heat recovery unit for waste gases of a heat engine of a cogeneration unit. The possibilities of using for this purpose the discrete-modular principle and complex methods of efficiency analysis are analyzed.

Бібл. 10, табл.1, рис.1.

Ключові слова: ексергетична ефективність, дискретно-модульний принцип, комплексні методики, теплоутилізатор.

1. Вступ.

Підвищення ефективності теплоутилізаційних технологій для енергетичних установок різного типу є частиною загальної проблеми енергозбереження в Україні. Недостатня ефективність теплоутилізаційних технологій визначається недосконалістю обладнання та існуючих методів його аналізу. Використання сучасних комплексних методик аналізу ефективності, а також детальне дослідження всіх складових елементів теплоутилізаційних систем дозволять оптимізувати процеси енергоспоживання в таких системах.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми.

Важливим аспектом досліджень ексергетичної ефективності установок в Україні і в світі є дослідження їх окремих елементів і виявлення елементів, які мають високі втрати ексергії [1-10]. Робота [1] присвячена детальному ексергетичному аналізу всіх елементів високотемпературної електростанції з комбінованим циклом. Система аналізується з ексергетичної точки зору на основі ексергоекономічної моделі. В роботі [2] розглядаються результати ексергоекономічного і ексергоекологічного аналізу окремих компонентів когенераційної системи, що об'єднує газотурбінну систему і сонячний колектор. Для кожного компонента системи оцінюються ексергетичні втрати і ексергетична ефективність. Метою роботи [3] є аналіз ефективності компонентів атомної електростанції, а також вияв-

лення за допомогою енергетичних та ексергетичних досліджень елементів, які мають високі втрати енергії і ексергії. Але найчастіше ефективність енергетичних установок оцінюється втратами ексергії або ексергетичним ККД. Такий аналіз на основі використання однієї або двох характеристик не може в достатній мірі описати роботу установки. У зв'язку з цим роботи, присвячені розвитку і застосуванню комплексного підходу на основі методів ексергетичного аналізу, наразі є важливими і актуальними [4-10]. Нові дослідження в цій області сприяють створенню високоекономічного теплоутилізаційного обладнання і значно розширюють можливості застосування методів ексергетичного аналізу в різних областях знань.

3. Мета роботи і завдання досліджень.

Метою роботи є підвищення ексергетичної ефективності утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Обрати методики для дослідження ефективності утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки.
- За допомогою обраних методик розрахувати і проаналізувати ексергетичні характеристики для окремих модулів теплоутилізатора.
- Виділити модулі теплоутилізатора, для яких необхідна оптимізація або конструктивна доробка.

4. Матеріали та методи досліджень.

В роботі проведено дослідження ефективності утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки. Дослідження проводилися з використанням дискретно-модульного принципу та комплексних методик на основі ексергетичних методів аналізу.

5. Результати досліджень.

5.1 Вибір методик для дослідження ефективності утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки.

Експлуатація теплоутилізаційних систем пов'язана з теплою різного потенціалу і необхідністю вибору величин, які дозволяють об'єктивно порівнювати в кількісних оцінках по фізично однорідним категоріям якісно нерівноцінні енергоресурси. Тому для отримання математичних моделей в застосуванні до теплоутилізаційних систем можна вважати термодинамічно виправданим використання в рамках комплексних методик дослідження концепції ексергетичного аналізу. Широке поширення методи ексергетичного аналізу отримали завдяки основним особливостям ексергетичних характеристик: універсальності і адитивності. Зазначені особливості дають можливість при дослідженні ефективності теплоутилізаторів використовувати дискретно-модульний принцип, тобто уявлення теплоутилізатора у вигляді системи дискретних модулів. При цьому до уваги беруться властивості модуля, що визначають матеріальну і енергетичну взаємодію його з іншими модулями теплоутилізатора.

Вивчення конструктивних особливостей утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки дозволило в даній роботі використовувати уявлення теплоутилізатора у вигляді системи дискретних модулів, що дозволяє виділити окремі модулі, в яких втрати ексергії найбільші. Різноманітність ексергетичних методів, що застосовуються для термодинамічного аналізу енергетичних установок, дозволила використовувати для дослідження ексергетичної ефективності теплоутилізатора комплексні методики, що включають деякі з методів ексергетичного аналізу. При цьому особлива увага приділялася тому, що методики повинні відрізнятися простотою розрахунків, а також надавати можливість визначення максимальної кількості ексергетичних характеристик при невеликій кількості вихідних даних. Серед методів ексергетичного аналізу, що наразі застосовуються при дослідженнях ефективності енергетичних установок, для використання в комплексних методиках доцільно обрати два методи:

- ексергетичний метод термодинамічного аналізу на основі ексерго-дисипативних функцій, який дозволяє

диференціювати ексергетичні втрати в елементах теплоутилізаційних систем і встановлювати області їх локалізації;

- інтегральний балансовий метод, сутність якого полягає в тому, що всі ексергетичні потоки, що проходять крізь замкнуту контрольну поверхню термодинамічної системи, включаються в інтегральний ексергетичний баланс.

5.2 Розрахунок ексергетичних характеристик для окремих модулів теплоутилізатора.

Досліджуваній теплоутилізатор є трубчастим газозводним теплообмінником з шаховим компонуванням в пучку. Теплоутилізатор моделювався у вигляді системи з восьми послідовно з'єднаних модулів. В рамках першої методики, що включає розрахунок ексерго-дисипативних функцій, використано локальне диференціальне рівняння ексергії. На підставі цього рівняння для кожного з восьми модулів теплоутилізатора розраховано ексерго-дисипативні функції, що визначають втрати ексергії в процесах тепловіддачі від димових газів до стінки D_{a1} , від стінки до води D_{a2} , в процесах теплопровідності D_{λ} , втрати ексергії, пов'язані з рухом теплоносіїв D_G , і сумарна дисипативна функція D . В рамках другої методики за допомогою інтегрального балансового методу ексергетичного аналізу розраховано загальні ексергетичні втрати E в модулях теплоутилізатору та ексергетичні критерії ϵ і k_{ex}^m (табл.1, рис.1). Тепло-ексергетичний критерій ϵ визначає втрати ексергетичної потужності в модулі теплоутилізатора на одиницю теплової потужності. Ексерго-технологічний критерій k включає також масу модуля.

Обговорення результатів дослідження

Як видно з таблиці і рисунка, спостерігається закономірне зменшення ексергетичних втрат і тепло-ексергетичного критерію ефективності при переході від першого до восьмого модулів теплоутилізатора. Це пов'язано зі зниженням термодинамічної незворотності процесів, яка визначається різницею температур ΔT при теплообміні між теплоносіями. Однак зазначені ексергетичні характеристики для третього і четвертого модулів теплоутилізатора розташовуються вище, ніж передбачає залежність ексергетичних характеристик від ΔT . Це вказує на термодинамічну недосконалість цих модулів. Більш високі значення ексерго-технологічного критерію ефективності для першого, сьомого і восьмого модулів теплоутилізатора свідчать про їх конструктивну недосконалість. Основні втрати ексергії у всіх модулях теплоутилізатора пов'язані із втратами внаслідок тепловіддачі від димових газів до стінки. Розбіжність між значеннями загальних ексергетичних втрат D і E ,

Таблиця 1. Ексерго-дисипативні функції окремих модулів утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки

Параметр	Номер модуля за рухом димових газів							
	1	2	3	4	5	6	7	8
D_{a1} , кВт	39,40	38,60	42,90	39,80	36,21	32,52	28,89	25,50
D_{a2} , кВт	2,53	2,14	2,17	2,15	1,86	1,65	1,45	1,25
D_{λ} , кВт	0,37	0,35	0,39	0,36	0,32	0,28	0,24	0,21
D_G , кВт	0,30	0,28	0,30	0,28	0,22	0,20	0,18	0,17
D , кВт	42,60	41,37	45,76	42,59	38,61	34,65	30,76	27,13
ΔT , К	355,3	334,1	311,0	288,1	266,1	245,2	225,5	207,1
E , кВт	41,8	40,2	46,0	43,0	39,3	35,2	30,6	27,3
ε	0,417	0,404	0,408	0,410	0,385	0,371	0,350	0,340
k_{ex}^T кг/кВт	0,416	0,346	0,354	0,358	0,376	0,391	0,400	0,424

Рис. 1. Ексергетичні характеристики окремих елементів утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки
 а) 1 - D ; 2 - D_{a1} ; 3 - E ; б) 4 - D_{a2} ; 5 - D_{λ} ; 6 - D_G .

розрахованих в рамках використовуваних методик, незначна і становить, в середньому, 1,6%. Це свідчить про те, що обидві методики можна використовувати при дослідженні ефективності різних схем утилізації теплоти. Однак в кожному конкретному випадку проведення ексергетичного аналізу теплообмінників необхідно

обрати методику, за допомогою якої можна визначити окремі елементи, які потребують конструктивного доопрацювання. Методику, засновану на інтегральному балансовому методі ексергетичного аналізу можна вважати ефективною завдяки незначній кількості вихідних параметрів, необхідних для розрахунку, і простоти

розрахунково-аналітичних методів для отримання ексергетичних характеристик. Однак, маючи певні переваги, ця методика, не дозволяє розділити причини, які викликають втрати ексергії в окремих елементах або окремих модулях елементів теплоутилізаційної системи. Перевагою методики на основі ексерго-дисипативних функцій, є те, що вона дозволяє диференціювати ексергетичні втрати в окремих модулях теплоутилізатора, пов'язані з нерівноважним теплообміном між теплоносіями і стінкою, теплопровідністю і рухом теплоносіїв, а також встановити причини і області їх локалізації. Однак при реалізації даного методу використовується більша кількість вихідних параметрів, необхідних для розрахунку. Оцінка ексергетичної ефективності окремих модулів теплоутилізатора за допомогою зазначених методик дозволяє виділити модулі, які потребують оптимізації або конструктивного доопрацювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у використанні дискретно-модульного принципу та комплексних методик на основі ексергетичних методів аналізу для дослідження ефективності утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки. Практична цінність пов'язана з можливістю використання отриманих результатів при проектуванні утилізаторів теплоти відхідних газів для конкретних схем утилізації теплоти.

Висновки

1. Проведено аналіз можливості застосування комплексних методик на основі ексерго-дисипативних функцій та ексергетичних балансів, для дослідження ефективності утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки.
2. За допомогою комплексних методик розраховано і проаналізовано ексергетичні характеристики для окремих модулів теплоутилізатора і виділено модулі теплоутилізатора, які потребують оптимізації або конструктивної доробки.
3. Проведено порівняльний аналіз використаних методик і визначено їхні переваги і недоліки.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Libertini L., Vicidomin M.* (2016). Exergetic Analysis of a Novel Solar Cooling System for Combined Cycle Power Plants Francesco Calise. Entropy, (18), 356. doi:10.3390/e18100356.

2. *Cavalcanti E. JC.* Exergoeconomic and exergo-environmental analyses of an integrated solar combined cycle system. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. 67. P. 507-519.

3. *Terzi R., Tükenmez İ., Kurt E.* (2016). Energy and exergy analyses of a VVER type nuclear power plant Energy and Exergy Analyses of a VVER Nuclear Power Plant. International. Journal of Hydrogen Energy, (41), 1-12. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74433>.

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. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. 6/8 (96). P. 43-48. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.147526.

5. *Фялко Н.М., Степанова А.И., Пресич Г.А., Гнедаш Г.А.* Анализ эффективности теплоутилизационной установки для нагревания и увлажнения дутьевого воздуха котлоагрегата. Промышленная теплотехника. 2015. №4(37). С.71-79.

6. *Фялко Н.М., Степанова А.И., Пресич Г.А., Навродская Р.А., Шеренковский Ю. В., Малецкая О.Е., Гнедаш Г.А.* Термодинамическая оптимизация и анализ эффективности теплоутилизационных систем котельных агрегатов. Промышленная теплотехника. 2012. №2(34). С.59 - 66.

7. *Фялко Н.М., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю. В.* Эффективность теплоутилизационной установки для котельных, оптимизированной различными методами. Промышленная теплотехника. 2014. №1(36). С.41-46.

8. *Степанова А.И.* Анализ эффективности установки с комбинированной теплоутилизационной системой для подогрева воды и дутьевого воздуха котлоагрегата. Промышленная теплотехника. 2016. № 4(38). С. 38-45.

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

EXERGIC EFFICIENCY OF THE HEAT RECOVERY UNIT FOR WASTE GASES OF A HEAT ENGINE OF A COGENERATION PLANT

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

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Science of Ukraine, Maria Kapnist str., 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.6>

Abstrakt. The paper presents the results of a study of the efficiency of a heat recovery unit for waste gases of a heat engine of a cogeneration plant. The possibilities of using for this purpose the discrete-modular principle and complex methods of analyzing the efficiency of heat recovery systems, which are based on the methods of exergo-dissipative functions and exergic balances, are analyzed. The design features of the heat exchanger are considered and a conclusion is made about the possibility of presenting it as a system of eight discrete modules. The results of calculating the exergy characteristics for each of the eight heat exchanger modules, performed within the framework of the indicated methods, are presented. A regular decrease in exergy losses and heat-exergy criterion of efficiency is observed during the transition from the first to the eighth module of the heat recovery unit. However, exergy characteristics for the third and fourth modules of the heat exchanger are somewhat higher than the indicated dependence suggests. This indicates the thermodynamic imperfection of these modules. The main exergy losses in all heat exchanger modules are associated with losses due to heat transfer from flue gases to the wall. An insignificant discrepancy between the values of the total exergy losses calculated within the framework of the methods used indicates that both methods can be used in various heat recovery schemes. However, in each specific case, it is necessary to choose a methodology with which it is possible to identify individual elements that need optimization or constructive improvement. Particular attention is paid to the comparative analysis of the selected techniques and consideration of the advantages and disadvantages of their use in various cases. It is noted that the technique based on the integral balance method of exergy analysis can be considered effective due to the small number of initial parameters and the simplicity of the analytical and calculation methods. The advantage of the technique using exergo-dissipative functions is that it allows one to differentiate exergy losses in a heat exchanger and establish the causes and areas of their localization.

References 10, figures 1, tables 1.

Keywords: exergy efficiency, discrete-modular principle, complex techniques, heat recovery unit.

1. *Libertini L., Vicidomin M.* (2016). Exergetic Analysis of a Novel Solar Cooling System for Combined Cycle Power Plants Francesco Calise. *Entropy*, (18), 356. doi:10.3390/e18100356.

2. *Cavalcanti E. JC.* Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. 67. P. 507-519.

3. *Terzi R., Tükenmez İ., Kurt E.* (2016). Energy and exergy analyses of a VVER type nuclear power plant Energy and Exergy Analyses of a VVER Nuclear Power Plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, (41), 1-12. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74433>.

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. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 6/8 (96). P. 43-48. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.147526.

5. *Fialko N.M., Stepanova A.I., Presich G.A., Gnedash G.A.* [Analysis of the efficiency of a heat recovery unit for heating and humidifying the blast air of the boiler]. [Industrial heat engineering]. 2015. V. 37(4). P. 71-79. (in Rus.)

6. *Fialko N.M., Stepanova A.I., Presich G., A., Navrodska R.A., Sherenkovskiy Ju.V., Maletskaya O.E., Gnedash G.A.* [Thermodynamic optimization and analysis of the efficiency of heat recovery systems of boiler units]. [Industrial Heat Engineering]. 2012. V. 34(2). P. 59-66. (in Ukr.)

7. *Fialko N.M., Stepanova A.I., Navrodska R.A., Sherenkovskiy Ju. V.* [Efficiency of heat recovery installation for boiler rooms, optimized by different methods]. [Industrial Heat Engineering]. 2014. V. 36 (1). P. 41-46. (in Rus.)

8. *Stepanova A.I.* [Analysis of the efficiency of the installation with a combined heat recovery system for heating water and blast air of the boiler]. [Industrial Heat Engineering]. 2016. V. 38 (4). P. 38-45. (in Rus.)

9. *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. №15(1). P.61-63. (in Rus.)

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. (in Rus.)

Отримано 19.06.2020

Received 19.06.2020