УДК 621.036.7 DOI 10.31548/energiya2020.01.038

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕКСЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Н. М. Фіалко, доктор технічних наук, професор,

член-кореспондент НАН України

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

Р. О. Навродська, 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. *Для оцінки ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем використовувався комплексний підхід, який дозволяє оцінювати роботу теплоутилізаційних систем одночасно з декількох позицій: термодинамічної, теплотехнічної, технологічної. У цій роботі в межах зазначеного підходу використовувалися тепло-ексергетичний критерій ефективності та ексергетичний ККД. Досліджено чотири типи теплоутилізаційних систем різного призначення для котельних установок. Для розглянутих систем розроблено структурні схеми, в яких ідентифіковано ексергетичні потоки між окремими дискретними елементами простої структури. Розрахунок ексергетичних характеристик проводився за допомогою балансових методів ексергетичного аналізу і методики, що поєднує методи ексергетичного аналізу з методом RP-уявлення термодинамічних балансів системи в матричній формі. На основі розрахованих ексергетичних характеристик проведено порівняльний аналіз ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем різного призначення. За результатами досліджень одним з можливих шляхів зниження загальних ексергетичних втрат в теплоутилізаційних системах є зниження втрат в насосній системі і системі трубопроводів. Це зниження досягається за рахунок агрегатування максимальної кількості функціональних елементів теплоутилізаційної системи в одному апараті. Показано, що для схеми теплоутилізації, в якій три основних елементи конструктивно об'єднано в одному корпусі, тепло-ексергетичний критерій зменшується на 6,7 %, а ексергетичний ККД підвищується на 4,0 % порівняно з неагрегатованою схемою теплоутилізації. Отже, найкращими ексергетичними показниками характеризуються теплоутилізаційні системи з комбінованим використанням утилізованої теплоти для нагрівання різних теплоносіїв і агрегатуванням основних елементів системи в одному корпусі.*

Ключові слова: ***котельні установки; утилізація теплоти відхідних газів, ексергетичні втрати, комплексні методики; ефективність***

Актуальність. Останнім часом через підвищення вартості палива і посилення екологічних проблем в Україні велика увага в сфері комунальної енергетики приділяється розробленню, дослідженню та впровадженню ефективних технологій утилізації скидної теплоти різних установок [1-8]. При цьому в країні є досить високий потенціал для впровадження таких технологій, що визначає важливість і актуальність проведених в цій галузі досліджень. Вирішення питання про доцільність реалізації тієї чи іншої теплоутилізаційної схеми має базуватися на всебічному аналізі, що дозволяє врахувати вплив на ефективність теплоутилізації максимально можливої кількості факторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нині в багатьох країнах світу для оцінки ефективності енергетичних установок різного типу, зокрема і теплоутилізаційних систем, успішно використовуються методи ексергетичного аналізу [1-7]. Так, в роботі [1] розглядаються результати порівняльного ексергетичного аналізу систем утилізації відпрацьованої теплоти газового двигуна для вироблення електроенергії. Пропонується кілька різних підходів до утилізації теплоти і порівнюється їх ексергетична ефективність. У роботі [2] порівнюються різні системи утилізації теплоти використовувані на цементному заводі з точки зору вироблення електроенергії і втрат ексергії. Для виявлення кращої системи до всіх пропонованих циклів застосовується алгоритм оптимізації і визначається система, що є найбільш ексергетично ефективною. У роботі [3] відзначається, що використання ексергетичних методів аналізу для передових енергетичних технологій може надати істотну допомогу в досягненні оптимальних концепцій проектування. У більшості досліджень при оцінюванні досконалості роботи теплоутилізаційних систем використовується тільки один з підходів: теплотехнічний, ексергетичний, економічний, що, як правило, не відображає сутності досліджуваних процесів. У роботі [4] застосовується комплексний підхід, що дозволяє оцінювати роботу теплоутилізаційних систем одночасно з декількох позицій. У статті [5] проведено аналіз ефективності теплоутилізаційної установки для нагрівання і зволоження дуттьового повітря котлоагрегату. Дослідження [6, 7]

присвячені застосуванню для аналізу ефективності енергетичних установок різного типу ексергетичного підходу із створенням комплексних методик, що поєднують методи ексергетичного аналізу з іншими сучасними методами досліджень.

Роботи в цьому напрямку сприяють створенню ефективних технологій утилізації теплоти і значно розширюють можливості застосування методів ексергетичного аналізу в різних областях знань.

Мета дослідження – порівняльний аналіз ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем різного призначення для котельних установок.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити структурні схеми теплоутилізаційних систем, в яких ідентифіковано ексергетичні потоки між окремими дискретними елементами простої структури;
- розрахувати ексергетичні характеристики для розглянутих схем теплоутилізації;
- з використанням комплексного підходу провести порівняльний аналіз ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем різного призначення для котельних установок.

Матеріали і методи дослідження. Для дослідження ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем використовується комплексний підхід із застосуванням методів ексергетичного аналізу. Цей підхід дозволяє оцінювати роботу теплоутилізаційної системи одночасно з декількох позицій: термодинамічної, теплотехнічної, технологічної. У цій роботі в рамках зазначеного підходу використовувалися тепло-ексергетичної критерій ефективності ε і ексергетичний ККД η_{ex}. Перший визначає втрати ексергетичної потужності в системі на одиницю теплової потужності, другий – кількість корисної ексергії на одиницю витраченої ексергії.

Результати досліджень та їх обговорення. Розробка структурних схем теплоутилізаційних систем, в яких ідентифіковано ексергетичні потоки між окремими дискретними елементами простої структури

Розглядалося чотири типи теплоутилізаційних систем різного призначення для котельних установок. Для цих систем розроблено структурні схеми, в яких ідентифіковано ексергетичні потоки між окремими дискретними елементами простої структури (рис. 1-3).

Спочатку розглядалася теплоутилізаційна система газоспоживальної котельної установки, призначеної для нагрівання зворотної тепломережної води котельні (I схема теплоутилізації, рис. 1).

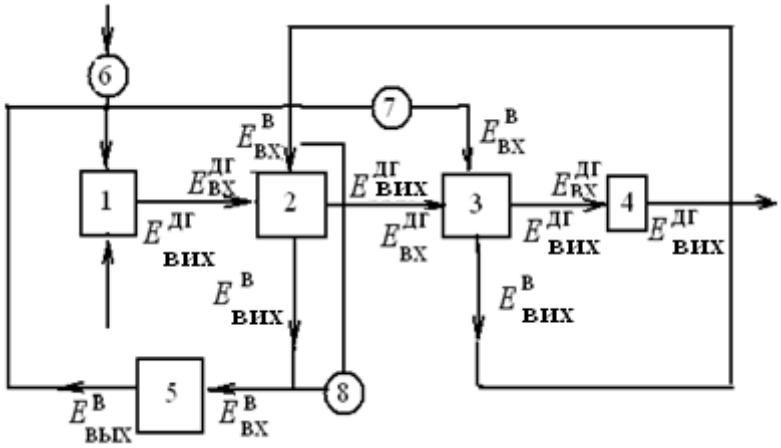

Рис. 1. Структурна схема котельної установки з теплоутилізаційною системою для нагрівання зворотної тепломережної води та ідентифікацією ексергетичних потоків між окремими дискретними елементами простої структури:

1 - пальниковий пристрій; 2 - котел; 3 - водонагрівач; 4 - димосос; 5 - споживач теплоти; 6 - вентилятор; 7 - насос мережевий; 8 - насос рециркуляційний.

Основний елемент наведеної схеми – поверхневий теплоутилізатор конденсаційного типу (для охолодження димових газів нижче температури точки роси водяної пари, що міститься в газах), який виконується у вигляді окремої приставки до котла. Теплообмінна поверхня теплоутилізатора компонується з оребрених біметалевих труб (сталева основа і оребрення з алюмінію).

Другою розглядалася комбінована теплоутилізаційна система з нагріванням води, призначеної для підігрівання і зволоження дуттьового повітря, що надходить в пальники котла (II схема теплоутилізації, рис. 2).

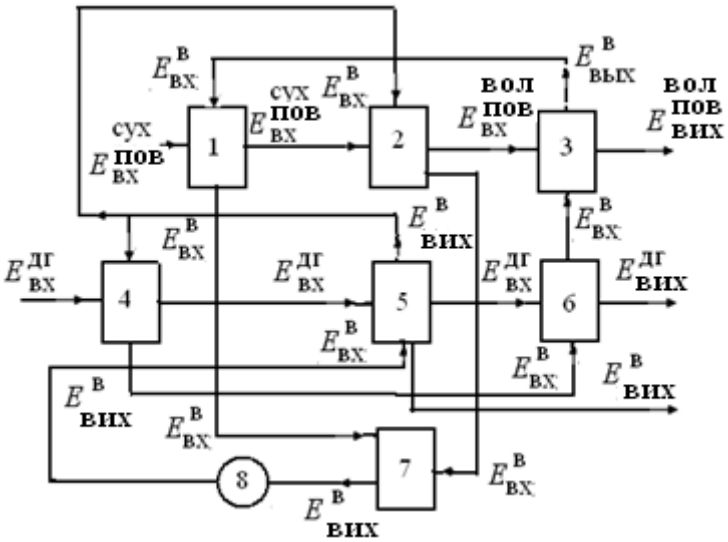

Рис. 2. Структурна схема комбінованої теплоутилізаційної системи для підігрівання і зволоження дуттьового повітря:

1 - повітронагрівач; 2 - контактний підігрівач і зволожувач повітря;

3 - повітродогрівач; 4 - вододогрівач; 5 - поверхневий водопідігрівач;

6 - газопідігрівач; 7 - водозбірник; 8 – циркуляційний насос

У цій схемі використано поверхневі теплообмінники 1, 3-6, що виконуються із зазначених оребрених труб, і контактний повітропідігрівач із поліхлорвініловою насадкою [8].

У третій ситуації розглядалася комбінована теплоутилізаційна система, призначена для підігрівання зворотної тепломережної води та дуттьового повітря (III схема теплоутилізації, рис. 3). Основні елементи цієї схеми – поверхневі водо- і повітрогрійний теплоутилізатори. У цій теплоутилізаційній системі зазначені теплоутилізатори встановлено окремо. Водогрійний теплоутилізатор компонується з оребрених біметалевих труб, а повітрогрійний - з пакетів сталевих пластин. При цьому водогрійний теплоутилізатор виконує функцію збільшеної конвективної частини котла, а повітрогрійний – його повітропідігрівача.

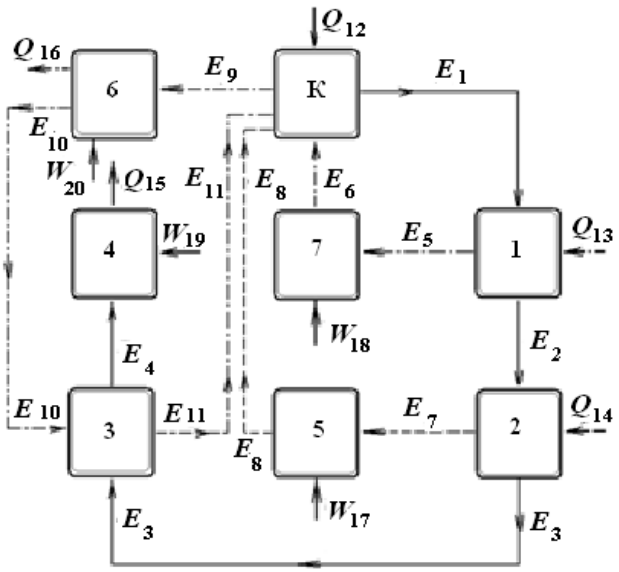

Рис. 3. Структурна схема котельні установки з комбінованою теплоутилізаційною системою для підігрівання зворотної води та дуттьового повітря:

К - котел; 1, 2 - водогрійний і повітрогрійний теплоутилізатори;

3 - газопідігрівач; 4 - димосос; 5 - вентилятор; 6, 7 - насоси;

⟶ – димові гази, - - ➔ - повітря, -·-➔ - вода; E_1 - E_{11} - ексергетичні потоки;

Q_{12} - Q_{16} - теплові потоки; W_{17} - W_{20} - енергетичні потоки

Четвертою (IV схема теплоутилізації) розглядалася агрегатована теплоутилізаційна установка за третім варіантом теплоутилізації, тобто з комбінованим використанням теплоти утилізації для підігрівання зворотної тепломережної води та дуттьового повітря. У цій установці елементи 1, 2, 3 (див. рис. 3) конструктивно об'єднані в одному корпусі.

Результати розрахунку ексергетичних характеристик для досліджуваних схем теплоутилізації

Розрахунок ексергетичних характеристик для розглянутих схем теплоутилізації виконувався за допомогою балансових методів ексергетичного аналізу і методики, що заснована на комплексному підході та поєднує методи ексергетичного аналізу з методом *RP*-уявлення термодинамічних балансів системи в матричній формі. Результати розрахунку ексергетичних характеристик наведено в табл.1.

1. Результати розрахунку ексергетичних характеристик для різних схем теплоутилізації

Схеми теплоутилізації	ε	η_{ex} ,%
I	0,56	24,7
II	0,22	32,5
III	0,15	37,8
IV	0,14	39,3

Для третьої схеми теплоутилізації розраховано ексергетичні втрати в усіх елементах теплоутилізаційної системи при різних режимах роботи котла з метою встановлення елементів з найбільшими ексергетичними втратами. Для прикладу в табл. 2 наведено вихідні дані для визначення величин теплових і ексергетичних потоків в теплоутилізаційній системі для режиму роботи котла з 55 % встановленої потужності.

2. Вихідні дані для визначення ексергетичної втрат (III схема теплоутилізації)

№ потоку	55 % встановленої потужності котла			
	T, °*C*	c_p,кДж/кг К	*G*,кг/с	*P*,бар
1	117,5	1,07	0,48	0,998
2	58,3	1,06	0,48	0,9954
3	45,2	1,06	0,48	0,9935
4	53,2	1,06	0,48	0,9917
5	55,1	4,18	10,58	9,99
6	55,0	4,18	10,58	10,0
7	14,6	1,04	0,44	0,998
8	14,0	1,04	0,44	0,998
9	80,6	4,20	10,58	10,0
10	80,6	4,20	0,30	12,0
11	77,5	4,19	0,30	10,0
13	54,3	4,18	10,58	10,0
14	0	1,04	0,44	0,999
15	53,0	1,06	0,48	0,999
16	80,6	4,20	10,58	12,0

Позначення в таблиці: *T* – температура димових газів, °C; c_p – питома теплоємність, кДж/кг·грд; *G* – витрата димових газів, кг/с; *P* – тиск, бар.

Результати розрахунку ексергетичної втрат в елементах теплоутилізаційної системи за різних режимів роботи котла подано табл. 3.

3. Втрати ексергетичної потужності в елементах теплоутилізаційної системи при різних режимах роботи котла (ІІІ схема теплоутилізації)

Елемент теплоутилізаційної системи	Ексергетичні втрати, кВт			
	Потужність котла в % від встановленої потужності			
	100	77	55	30
Водогрійний теплоутилізатор	21,8	6,8	0,7	0,3
Повітрогрійний теплоутилізатор	2,5	1,5	1,0	0,2
Газопідігрівач	0,8	0,6	0,5	0,1
Димосос	7,3	5,3	2,7	0,9
Вентилятор	3,2	2,0	0,9	0,3
Насос	3,6	2,8	2,4	0,6
Насос	3.1	2,9	1,6	0,6
Система трубопроводів	4,3	1,6	0,6	0,2

Як видно з табл. 1, найбільшою ексергетичною ефективністю характеризується четверта схема теплоутилізації, найменшою – перша схема. При нагріванні одного теплоносія (І схема теплоутилізації) глибоке охолодження димових газів котла реалізується не в усіх режимах його роботи [6]. При переході до комбінованих схем теплоутилізації відбувається підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем. Це пов’язано з тим, що в комбінованих системах утилізована теплота використовується для підігрівання декількох теплоносіїв, що забезпечує поглиблене охолодження димових газів і завдяки цьому збільшення теплоти утилізації. Внаслідок збільшення цієї теплоти ексергетична ефективність теплоутилізаційних систем зростає.

Як видно з табл. 3, у третій схемі теплоутилізації найбільші ексергетичні втрати при всіх значеннях потужності котла відбуваються в водогрійному теплоутилізаторі, найменші втрати – в повітрогрійному теплоутилізаторі та в газопідігрівачі. Відносний внесок водогрійного теплоутилізатора в сумарну незворотність процесів в системі зростає до 46,8 % при збільшенні потужності котла до 100 % встановленої потужності. Загальний внесок насосної системи і системи трубопроводів, що з'єднує основні елементи, в сумарну незворотність процесів в системі досить значний при всіх значеннях потужності котла і становить, в середньому, 44,1 %. Цей внесок можна порівняти з внеском одного з основних елементів системи – водогрійного теплоутилізатора.

Отже, одним із шляхів зниження загальних ексергетичних втрат в теплоутилізаційних системах є зниження втрат в насосній системі і системі трубопроводів. Це досягається за рахунок агрегатування максимальної кількості функціональних елементів теплоутилізаційної системи в одному апараті. Так для четвертої схеми теплоутилізації, в якій три основних елементи конструктивно об'єднано в одному корпусі, тепло-ексергетичний критерій зменшується на 6,7 %, а ексергетичний ККД підвищується на 4,0 % порівняно з третьою схемою теплоутилізації. Таке конструкційне виконання забезпечує, крім зниження ексергетичних, теплових і енергетичних втрат, збільшення компактності і зменшення металоємності теплоутилізаційної установки.

Отримані результати дослідження ексергетичної ефективності корелюють з тепловими дослідженнями теплоутилізаційних систем. Так, використання комбінованих теплоутилізаційних систем з глибокою утилізацією теплоти і утворенням конденсату від димових газів призводить до підвищення теплового ККД котельної установки на 5-10 % або підвищення коефіцієнта використання теплоти палива на 8-14 %. Крім того, внаслідок зменшення витрати палива, розчинення в конденсаті шкідливих речовин, зниження температури в топці котла при подачі до неї підігрітого і насиченого водяною парою повітря, такі теплоутилізаційні системи характеризується підвищеною екологічною ефективністю.

Слід зазначити, що вибір схеми використання утилізованої теплоти визначається, поряд з перерахованими показниками ефективності, рядом інших факторів. Основними з них є потреба в певному виді теплоносія, вартість палива, можливість використання ефективних поверхонь нагрівання та ін.

Наукова новизна отриманих результатів та практична цінність. Вперше з використанням комплексного підходу на основі ексергетичних методів аналізу і ексергетичних критеріїв проведено порівняльний аналіз ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем різного призначення для котельних установок.

Отримані результати використано при проектуванні теплоутилізаційних систем котельних установок з урахуванням особливостей цих установок і конкретної схеми утилізації теплоти.

Висновки и перспективи.

1. Розроблено структурні схеми теплоутилізаційних систем, в яких ідентифіковано ексергетичні потоки між окремими дискретними елементами простої структури.

2. З використанням комплексного підходу, що дозволяє оцінити роботу теплоутилізаційної системи одночасно з декількох позицій, проведено порівняльний аналіз ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем різного призначення для котельних установок.

3. Показано, що найкращими ексергетичними показниками характеризуються теплоутилізаційні системи з комбінованим використанням утилізованої теплоти для нагрівання різних теплоносіїв і з агрегатуванням основних елементів системи в одному корпусі.

4. Результати виконаних досліджень буде використано при проектуванні новітніх систем теплоутилізації газоспоживальних котельних установок

Список літератури

1. Naeimi A, Bidi M., Ahmadi M., Kumar R., Sadeghzadeh M, Nazari M. Design and exergy analysis of waste heat recovery system and gas engine for power generation in Tehran cement factory. Thermal Science and Engineering Progress. 2019. T. 9. C. 299-307.

2. Mohammadi A., Ashjari M. A, Sadreddini A. Exergy analysis and optimisation of waste heat recovery systems for cement plants. International Journal of Sustainable Energy. 2018. T. 37, № 2. P. 115-133.

3. Terzi R., Tükenmez İ., Kurt E. Energy and exergy analyses of a VVER type nuclear power plant. International journal of hydrogen energy. 2016. T. 41, №. 29. P. 12465-12476.

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. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2018. №. 6 (8). С. 43-48.

5. Фиалко Н. М., Навродская Р. А., Степанова А. И., Гнедаш Г. А. Эффективность элементов комбинированной теплоутилизационной системы для

подогрева воды и дутьевого воздуха котельной установки. Промышленная теплотехника. 2015. Т. 37, № 5. С.75 - 83.

6. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Пресіч Г.О., Гнєдаш Г.О., Шевчук С.І., Степанова А. І. Комбіновані теплоутилізаційні системи для газоспоживальних котлів комунальної теплоенергетики. Київ, 2019. 192 с.

7. Фиалко Н. М., Степанова А. И., Навродская Р. А., Новаковский М. А. Анализ эффективности котельной установки с комбинированной теплоутилизационной системой при различных режимах работы котла. Промышленная теплотехника. 2017. Т. 39, № 1. С. 33-39.

8. Фіалко Н. М., Пресіч Г. О., Навродська Р. О., Гнєдаш Г. О. Екологічна ефективність комбінованих систем утилізації теплоти відхідних газів котельної установки. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. 2013. №755. С. 429-434.

References

1. Naeimi, A., Bidi, M., Ahmadi, M. H., Kumar, R., Sadeghzadeh, M., Nazari, M. A. (2019). Design and exergy analysis of waste heat recovery system and gas engine for power generation in Tehran cement factory. Thermal Science and Engineering Progress, *9*, 299-307.

2. Mohammadi, A., Ashjari, M. A., Sadreddini, A. (2018). Exergy analysis and optimisation of waste heat recovery systems for cement plants. International Journal of Sustainable Energy, 37(2), 115-133.

3. Terzi, R., Tükenmez, İ., Kurt, E. (2016). Energy and exergy analyses of a VVER type nuclear power plant. International journal of hydrogen energy, 41(29), 12465-12476.

4. 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. Eastem-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (8), 43-48.

5. Fialko, N., Navrodskaya, R., Stepanova, A., Gnedash, G. (2015). Efficiency of elements of combined heat utilisation system for heating of water and combustion air. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 37(5), 75-83.

6. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Presich, G. O., Gnedash, G. O., Shevchuk, S. I., Stepanova, A. I. (2019). Kombinovani teploutylizatsiini systemy dlia gazospozhyvalnykh kotliv komunalnoi energetyky [Combined heat recovery systems for gas-consuming boilers of municipal heat power engineering]. Kyiv, 192.

7. Fialko, N. M., Stepanova, A. I., Navrodskaia, R. A., Novakovskii, M. A. (2017). Analiz efektivnosti kotelnoy ustanovki s kombinirovannoy teploutilizatsionnoy sistemoy pri razlichnykh rezhimakh raboty kotla [Analysis of boiler plant efficiency with a combined heat recovery system under different modes of boiler operation]. Promyslova teplotekhnika, 39 (1), 33-39.

8. Fialko, N. M., Presich G. O., Navrodska R. O., Gnedash G.O. (2013) Ekologichna efektyvnist kombinovanykh system utylizatsii teplovykh vidkhidnykh gasiv kotelnoi ustanovky [Ecological efficiency of combined heat recovery systems of exhaust gases of

boiler plant]. Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Theory and Building Practice, 755, 429-434.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Н. М. Фиалко, А. И. Степанова, Р. А. Навродская, С. И. Шевчук

Аннотация. *Для оценки эксергетической эффективности теплоутилизационных систем использовался комплексный подход, который позволяет оценивать работу теплоутилизационных систем одновременно с нескольких позиций: термодинамической, теплотехнической, технологической. В данной работе в рамках указанного подхода использовались тепло- эксергетический критерий эффективности и эксергетический КПД. Исследовано четыре типа теплоутилизационных систем различного назначения для котельных установок. Для рассмотренных систем разработаны структурные схемы, в которых идентифицировано эксергетические потоки между отдельными дискретными элементами простой структуры. Расчет эксергетической характеристик производился с помощью балансовых методов эксергетического анализа и методики, сочетающей методы эксергетического анализа с методом RP-представление термодинамических балансов системы в матричной форме. На основе рассчитанных эксергетических характеристик проведен сравнительный анализ эксергетической эффективности теплоутилизационных систем различного назначения. Согласно результатам исследований одним из возможных путей снижения общих эксергетических потерь в теплоутилизационных системах является снижение потерь в насосной системе и системе трубопроводов. Это снижение достигается за счет агрегатирования максимального количества функциональных элементов теплоутилизационных системы в одном аппарате. Показано, что для схемы теплоутилизации, в которой три основных элемента конструктивно объединены в одном корпусе, тепло- эксергетический критерий уменьшается на 6,7 %, а эксергетический КПД повышается на 4,0 % по сравнению с неагрегатированной схемой теплоутилизации. Таким образом, наилучшими эксергетическими показателями характеризуются теплоутилизационные системы с комбинированным использованием утилизированной теплоты для нагрева различных теплоносителей и агрегатированием основных элементов системы в одном корпусе.*

Ключевые слова: ***котельные установки; утилизация теплоты отходящих газов, эксергетические потери, комплексные методики; эффективность***

COMPARATIVE ANALYSIS OF EXERGY EFFICIENCY OF HEAT RECOVERY SYSTEMS OF VARIOUS PURPOSE

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

Abstract. To assess the exergy efficiency of heat recovery systems, a complex approach was used, which allows us to evaluate the operation of heat recovery systems simultaneously from several positions: thermodynamic, heat engineering, and

technological. In this work, within the framework of this approach, the heat-exergy efficiency criterion and exergy efficiency were used. Four types of heat recovery systems for various purposes for boiler plants were investigated. For the systems under consideration, structural schemes have been developed in which exergy flows between individual discrete elements of a simple structure are identified. The calculation of exergy characteristics was carried out using the balance methods of exergy analysis and a technique combining the methods of exergy analysis with the RP method of representing the thermodynamic balances of the system in matrix form. Based on the calculated exergy characteristics, a comparative analysis of the exergy efficiency of heat recovery systems for various purposes is carried out. According to the research results, one of the possible ways to reduce the total exergy losses in heat recovery systems is to reduce losses in the pump system and piping system. This reduction is achieved by aggregating the maximum number of functional elements of the heat recovery system in one device. It is shown that for a heat recovery scheme in which the three main elements are structurally combined in one housing, the heat-exergy criterion is reduced by 6.7 %, and the exergy efficiency is increased by 4.0 % compared to the non-aggregated heat recovery scheme. Thus, heat recovery systems with complex use of recover heat for heating various heat-transfer agents and with aggregation of the main system elements in one housing are characterized by the best exergetic indicators.

Key words: ***boiler plants; waste gas heat recovery, exergy losses, complex techniques; efficiency***