



Н. М. Фіалко, А. І. Степанова, Р. О. Навродська, С. І. Шевчук

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

ЕКСЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРІВ РІЗНОГО ТИПУ ДЛЯ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ

Забезпечення високої ефективності роботи систем утилізації теплоти відхідних газів скловарних печей потребує дослідження ексергетичної ефективності теплообмінного устаткування, що входить до цих систем. У роботі проаналізовано ексергетичну ефективність теплоутилізаційного устаткування різного типу для зазначених систем. Наведено результати досліджень ексергетичних показників теплоутилізаторів з використанням двох нагріваних теплоносіїв – води та повітря. Наведено конструкційні особливості зазначених теплоутилізаторів та їхній модульний принцип виконання. За конструкціями теплоутилізаторів визначено можливість використання структурно-модульного принципу під час аналізу ефективності теплоутилізаторів. Ексергетичні властивості, що відображають сутність ексергетичних методів – універсальність і адитивність, дали змогу під час аналізу ефективності використовувати комплексний підхід на підставі методів ексергетичного аналізу. Оптимізаційні задачі для досліджуваних теплоутилізаторів розв'язано за допомогою зазначених методів у поєднанні зі статистичними методами теорії планування експерименту. Розрахунок ексергетичних втрат для окремих частин (модулів) теплоутилізаторів і для теплоутилізаторів загалом виконано за допомогою інтегрального балансового методу ексергетичного аналізу. Цільовими функціями оптимізації слугували тепло-ексергетичний та ексерго-технологічний критерії ефективності. За результатами досліджень показано, що як ексерго-технологічна, так і тепло-ексергетична ефективність для водогрійного теплоутилізатора в 1,1...1,2 рази менша, ніж для повітрогрійного. Це свідчить про вищу ексергетичну ефективність водогрійного устаткування систем теплоутилізації порівняно з повітрогрійним. При цьому водогрійні теплоутилізатори дають змогу підвищити коефіцієнт використання теплоти палива печі на 15...25 %, а повітрогрійні – тільки на 10...15 %. Незважаючи на нижчу теплову та ексергетичну ефективність повітрогрійних теплоутилізаторів, багато важливих факторів може визначити їх конкурентоспроможність у теплоутилізаційних технологіях скловарних печей. Доцільність використання водо- чи повітрогрійного устаткування в теплоутилізаційних технологіях визначається багатьма факторами, головними з яких є потреба склоробного підприємства в теплоенергії, що надходить з відповідним теплоносієм, сезонність використання цього теплоносія, технічна можливість та економічна ефективність спорудження системи теплоутилізації. Отримані результати досліджень ексергетичної ефективності водо- та повітрогрійних теплоутилізаторів можуть бути використані під час проектування теплоутилізаційних технологій, призначених для нагрівання води та повітря для різних потреб.

Ключові слова: теплоутилізатор; ефективність; ексергетичні методи; оптимізація.

Вступ. Утилізація теплоти відхідних газів скловарних печей є одним з найважливіших напрямів підвищення економічності устаткування для виробництва скла шляхом економії паливно-енергетичних і матеріальних ресурсів. На сьогодні ККД скловарних печей різного призначення не перевищує зазвичай 60 %, температура відхідних газів здебільшого становить 250...600 °С, а втрати теплоти з цими газами – 25...85 %. Утилізація цих втрат у водогрійному тепло-

утилізаційному устаткуванні може значною мірою компенсувати потреби склоробних підприємств у тепловій енергії на опалення та гаряче водопостачання, на які в котельнях витрачаються додаткові паливно-енергетичні ресурси. Сезонність експлуатації водогрійного теплоутилізаційного устаткування на склоробних підприємствах спонукає до розроблення нових рішень систем теплоутилізації запічних газів, зокрема з використанням теплоутилізаторів для нагрівання повітря, що надходить

Інформація про авторів:

Фіалко Наталія Михайлівна, д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу теплофізики енергоефективних теплотехнологій. Email: nmfialko@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>

Степанова Алла Ісаївна, канд. техн. наук, пров. наук співробітник, відділ теплофізики енергоефективних теплотехнологій. Email: navrodska-ittf@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-1711-7948>

Навродська Раїса Олександрівна, канд. техн. наук, пров. наук співробітник, відділ теплофізики енергоефективних теплотехнологій. Email: navrodska-ittf@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-7476-2962>

Шевчук Світлана Іванівна, канд. техн. наук, ст. наук співробітник, відділ теплофізики енергоефективних теплотехнологій. Email: s.i.shevchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8046-0039>

Цитування за ДСТУ: Фіалко Н. М., Степанова А. І., Навродська Р. О., Шевчук С. І. Ексергетична ефективність теплоутилізаторів різного типу для скловарних печей. Науковий вісник НЛТУ України. 2020, т. 30, № 2. С. 72–76.

Citation APA: Fialko, N. M., Stepanova, A. I., Navrodska, R. O., & Shevchuk, S. I. (2020). Exerget efficiency of different type heat recoverers for glassmaking furnaces. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(2), 72–76. <https://doi.org/10.36930/40300213>

до регенераторів печі і після них використовуватиметься в пальникових пристроях.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Останнім часом в Україні й у світі для оцінювання ефективності енергетичних установок різного типу дедалі ширше використовують методи ексергетичного аналізу. Важливим аспектом цих досліджень є вивчення ексергетичної ефективності окремих елементів установок і виявлення елементів, які мають великі втрати ексергії [3, 4]. У роботі [3] використано методи ексергетичного аналізу для оцінювання ефективності й оптимізації елементів теплоутилізаційних схем скловарних печей. У роботі [5] зазначено, що для традиційних енергетичних технологій виконано велику кількість ексергетичних досліджень, які дали корисні результати. Робота [4] присвячена детальному ексергетичному аналізу всіх елементів високотемпературної електростанції з комбінованим циклом на сонячних батареях. Систему аналізують з ексергетичної точки зору на підставі ексерго-економічної моделі. У роботі [6] аналізують термодинамічний цикл, який підходить для високотемпературних джерел теплоти. Теплові, термодинамічні й економічні моделі використовують для дослідження інтегрованої системи та окремих елементів з точки зору енергетичної, ексергетичної та економічної ефективності. Результати свідчать, що ексергетична ефективність для блока силового циклу досягає приблизно 64 %, тоді як загальна ексергетична ефективність електростанції становить 14 %. Але використання методів ексергетичного аналізу без поєднання його з іншими сучасними методами досліджень не може охопити проблему загалом, а саме не може надати оцінку роботі установки одночасно з термодинамічної, теплотехнічної та технологічної позицій. Роботи [1, 2] присвячено розвитку і застосуванню комплексного підходу на підставі методів ексергетичного аналізу для оцінювання ефективності енергетичних установок різного типу. Нові дослідження у цій царині сприяють створенню високоеконічного теплоутилізаційного обладнання і значно розширюють можливості застосування методів ексергетичного аналізу в різних сферах знань.

Об'єкт дослідження – ексергетична ефективність теплоутилізаторів різного типу систем утилізації теплоти відхідних газів скловарних печей.

Предмет дослідження: загальні закономірності зміни ексергетичних характеристик водо- та повітрогрійних теплоутилізаторів систем теплоутилізації в різних режимах їх роботи.

Мета роботи є порівняльний аналіз ексергетичної ефективності теплоутилізаторів різного типу, що входять до систем утилізації теплоти відхідних газів скловарних печей.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання дослідження:

- проаналізувати конструкційні особливості теплоутилізаторів для різних схем утилізації теплоти відхідних газів скловарних печей і вибрати методи дослідження їхньої ефективності;
- визначити оптимальні значення геометричних параметрів поверхні теплообміну теплоутилізаторів, використовуючи ексергетичні методи в поєднанні зі статистичними методами теорії планування експерименту;
- за допомогою методів ексергетичного аналізу і ексергетичних критеріїв ефективності виконати порівняльний аналіз ефективності зазначених теплоутилізаторів.

Наукова новизна результатів дослідження полягає в тому, що вперше з використанням комплексних підходів на підставі методів ексергетичного аналізу виконано порівняльний аналіз ексергетичної ефективності теплоутилізаторів різного типу, що застосовуються в теплоутилізаційних системах скловарних печей.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що отримані результати дослідження можуть бути використані під час проектування водо- і повітрогрійних теплоутилізаторів для систем утилізації теплоти скловарних печей та інших енергетичних установок.

Матеріали і методи дослідження. Використовували комплексні підходи на підставі методів ексергетичного аналізу для дослідження ексергетичної ефективності теплоутилізаторів різного типу.

Розглядали теплоутилізатори з використанням двох нагріваних теплоносіїв – води та повітря, а саме:

- поверхневий водогрійний теплоутилізатор, призначений для нагрівання димовими газами після регенераторів зворотної води систем теплостачання (рис. 1);
- поверхневий повітрогрійний теплоутилізатор, призначений для попереднього підігрівання повітря, що надходить в регенератори печі, способом охолодження відхідних від регенераторів димових газів (рис. 2).

Поверхневий водогрійний теплоутилізатор компонується із трьох модулів панельного типу, розташованих вертикально і з'єднаних між собою за газовим та водяними трактами. Теплообмінна частина кожного модуля компонується із секцій у вигляді панелей з колекторами, утвореними за допомогою гладких труб, з'єднаних зовнішніми мембранами. У теплоутилізаторі застосовується перехреснотічна схема з одноходовим рухом газів у міжпанельному просторі і багатходовим рухом у трубах нагріваного теплоносія при загальному протічному напрямку потоків теплоносіїв.

Поверхневий повітрогрійний теплоутилізатор конструкційно виконується з двох модулів із використанням панелей, утворених трубами із зовнішніми мембранами і кільцевими турбулізаторами потоку повітря всередині труб. Під час компонування панелей у теплоутилізаторах використовується шахове та коридорне розташування труб. Для повітрогрійних теплоутилізаторів застосовується перехреснотічна схема із двоходовим рухом газів у міжпанельному просторі й одноходовим рухом повітря у трубах.

Конструкційні особливості теплоутилізаторів визначили можливість використання структурно-модульного принципу під час аналізу їхньої ефективності. Ексергетичні властивості, що відображають сутність ексергетичних методів – універсальність і адитивність, дали змогу використовувати комплексний підхід на підставі методів ексергетичного аналізу.

За допомогою методів ексергетичного аналізу в поєднанні зі статистичними методами теорії планування експерименту вирішували оптимізаційні задачі для досліджуваних теплоутилізаторів. Цільовими функціями оптимізації використовувалися тепло-ексергетичний критерій ефективності ϵ , який показує втрати ексергетичної потужності у системі E_{II} на одиницю теплової потужності Q , а також ексерго-технологічний критерій ефективності k_{ex}^m , який дає змогу врахувати також масу теплоутилізатора. Незалежними змінними параметрами обрано геометричні параметри поверхні тепло-

обміну. Це відстань a між панелями або трубами пучка в напрямку, поперечному потоку газів, відстань b між

трубами в панелі або пучку в поздовжньому напрямку і діаметр труби d .

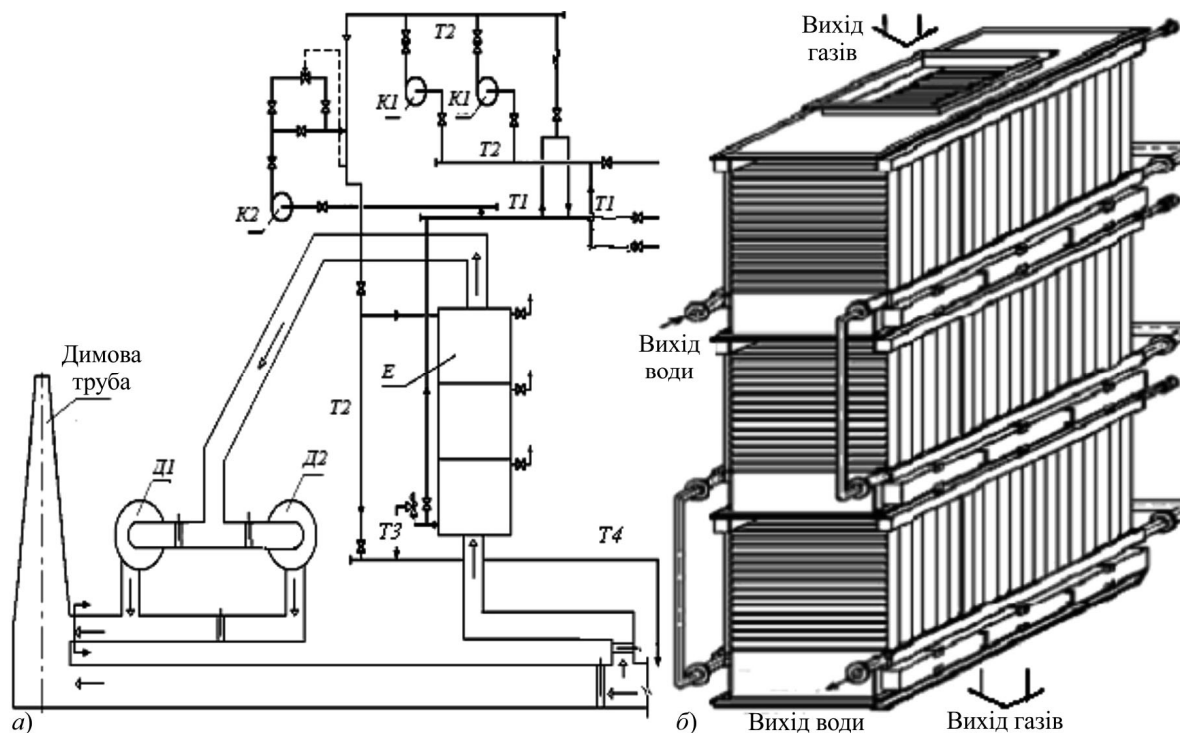


Рис. 1. Схема теплоутилізаційної установки (а) з поверхневим водогрійним теплоутилізатором (б), призначеним для нагрівання води системи опалення: Е – теплоутилізатор; К – насоси; Т – трубопроводи теплової мережі; Т3 – трубопровід підживлювальний; Т4 – трубопровід для спорожнення теплоутилізатора; ∇ – вентиль, засувка; \rightarrow – видалення повітря; \rightarrow – напрямки потоків димових газів і води; ∇ – запобіжний і зворотний клапани

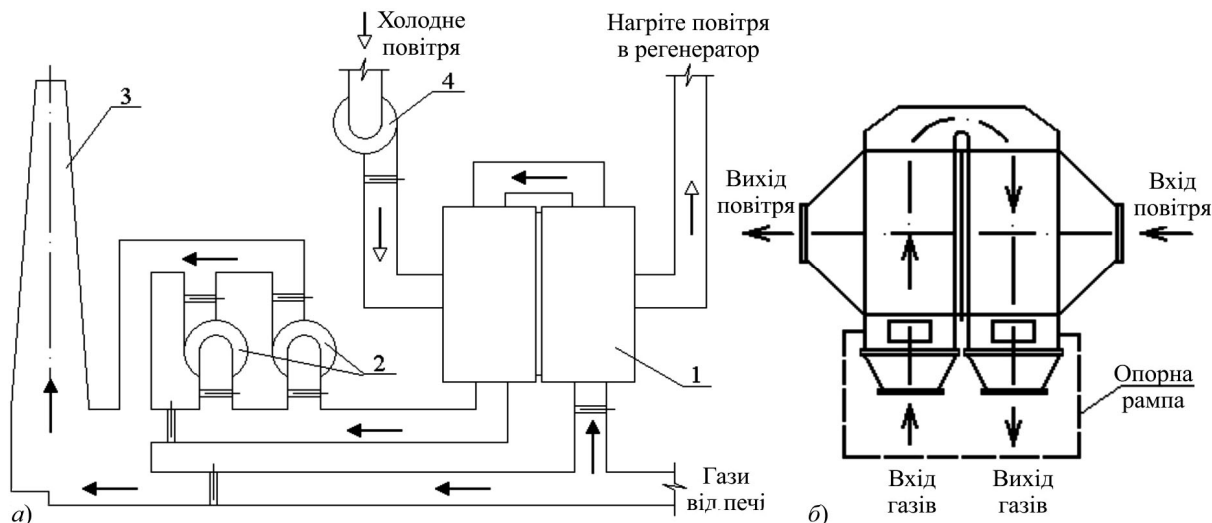


Рис. 2. Схема теплоутилізаційної у становки (а) з поверхневим повітрогрійним теплоутилізатором (б), призначеним для попереднього підігрівання холодного повітря перед надходженням його до регенераторів печі: 1) теплоутилізатор; 2) димосос; 3) димова труба; 4) вентилятор; \rightarrow – напрямки потоків повітря і димових газів; ∇ – газохід, повітропровід; \equiv – шибер

При отриманні функціональних залежностей в кожній серії досліджень проводилась рандомізація порядку проведення дослідів. Оцінку однорідності дисперсії проводили за критерієм Кохрена, перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії – за критерієм Ст'юдента, перевірку адекватності отриманих рівнянь використаним даним – за критерієм Фішера. На підставі мінімізації функціональних залежностей визначено оптимальні значення зазначених геометричних параметрів. Розрахунок ексергетичних втрат для окремих модулів теплоутилізаторів і для теплоутилізаторів загалом проводили за допомогою інтегрального балансового методу ексергетичного аналізу. Під час аналізу ефективності

теплоутилізаторів використовували зазначені вище ексергетичні критерії.

Результати дослідження

Визначення оптимальних значень геометричних параметрів поверхні теплообміну теплоутилізаторів різного типу. Порівняльний аналіз водо- та повітрогрійного теплоутилізаторів доцільно проводити тільки за умови, що зазначені теплоутилізатори максимально оптимізовано. За допомогою описаних методів вирішено оптимізаційні задачі для досліджуваних теплоутилізаторів. Їхні розрахункові оптимальні значення наведено в табл. 1.

Табл. 1. Оптимальні значення геометричних параметрів поверхні теплообміну теплоутилізаторів

Критерій оптимізації	Оптимізований параметр	Оптимальні значення параметрів для теплоутилізаторів			
		водогрійного		повітрогрійного	
		шаховий пучок	коридорний пучок	шаховий пучок	коридорний пучок
ε	a , мм	60,0	60,0	60,0	60,0
	b , мм	92,0	91,2	120,0	120,0
	d , мм	42,0	42,0	30,0	30,0
k_{ex}^T	a , мм	60,0	60,0	60,0	60,0
	b , мм	72,9	61,2	60,0	60,0
	d , мм	38,3	42,0	30,0	30,0

Виконання порівняльного аналізу ефективності теплоутилізаторів різного типу систем утилізації теплоти відхідних газів скловарних печей. Розрахунків ексергетичних втрат для окремих модулів теплоутилізаторів і теплоутилізаторів загалом виконували за допомогою інтегрального балансового методу ексергетичного аналізу. Під час аналізу використовували зазначені ексергетичні критерії (табл. 2, 3). Зменшення величини ексергетичних критеріїв відповідає збільшенню ексергетичної ефективності.

Табл. 2. Ексергетичні характеристики окремих модулів

Ексергетичний параметр	Номер модуля за рухом димових газів для теплоутилізаторів				
	водогрійного			повітрогрійного	
	1	2	3	1	2
Q , кВт	181	141	111	197	196
$E_{п}$, кВт	66,9	49,9	32,1	88,7	68,8
ε	0,37	0,35	0,29	0,45	0,35
k_{ex}^T , кг/кВт	1,59	1,96	2,03	2,13	1,67

Табл. 3. Ексергетичні характеристики теплоутилізаторів

Ексергетичний параметр	Тип теплоутилізатора	
	водогрійний	повітрогрійний
Q , кВт	433	393
$E_{п}$, кВт	148,9	157,5
ε	0,34	0,40
k_{ex}^T , кг/кВт	1,85	1,96

За результатами виконаних досліджень встановлено, що теплоутилізатори, в яких теплоносієм використовується вода, дають змогу підвищити коефіцієнт використання теплоти палива печі (КВП) на 15...25 %, а повітрогрійні теплоутилізатори забезпечують збільшення КВП печі тільки на 10...15 %.

Обговорення результатів дослідження. Як видно з табл. 2, величина тепло-ексергетичного критерію ефективності, який не враховує маси модуля теплоутилізатора, а визначає лише його термодинамічну досконалість, зменшується з переходом до модулів, розташованих за рухом димових газів, як для водо-, так і для повітрогрійного теплоутилізаторів. Це пов'язано зі зменшенням термодинамічної незворотності процесів перенесення, яка визначається кінцевою різницею температур при теплообміні між теплоносіями. Врахування маси модулів, тобто використання для аналізу ексергетичної ефективності ексерго-технологічного критерію, призводить до деякого зниження ексергетичної ефективності для другого і третього модулів водогрійного теплоутилізатора. Для повітрогрійного теплоутилізатора як ексерго-технологічна, так і тепло-ексергетична

ефективність другого модуля менше, ніж першого модуля. Величини ексергетичних критеріїв для водогрійного теплоутилізатора в 1,1...1,2 раза менші, ніж для повітрогрійного, що свідчить про нижчу ексергетичну ефективність останнього порівняно з водогрійним. Отримані результати досліджень ексергетичної ефективності корелюють з тепловими дослідженнями теплоутилізаційних систем.

Доцільність використання водо- чи повітрогрійного устаткування визначається багатьма факторами, головними з яких є потреба склоробного підприємства в теплоенергії, що надходить з відповідним теплоносієм, сезонність використання цього теплоносія, технічна можливість та економічна ефективність спорудження системи теплоутилізації. Незважаючи на нижчу ексергетичну ефективність повітрогрійних теплоутилізаторів, багато важливих факторів може визначати їх конкурентоспроможність у теплоутилізаційних технологіях скловарних печей. Отримані результати досліджень ексергетичної ефективності водо- та повітрогрійних теплоутилізаторів можуть бути використанні під час проектування теплоутилізаційних технологій, призначених для нагрівання води та повітря для різних потреб.

Висновки:

1. Виконано аналіз ексергетичної ефективності водо- та повітрогрійних теплоутилізаторів скловарних печей з використанням структурно-модульного принципу та комплексного підходу на підставі методів ексергетичного аналізу.
2. Визначено оптимальні значення геометричних параметрів поверхні теплообміну досліджуваних теплоутилізаторів.
3. За допомогою інтегрального балансового методу ексергетичного аналізу та ексергетичних критеріїв ефективності виконано порівняльний аналіз досліджуваних теплоутилізаторів різного типу.

References

1. 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), 43-48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147526>
2. Fialko, N., Navrodska, R., Sarioglo, A., Presich, G. A., & Slusar, M. A. (2010). Efficient Heat Recovery Technology for Glass-worked Furnaces. *Industrial heat engineering*, 32(5), 78-85. [In Russian].
3. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., Sherenkovsky, Yu., & Sarioglo, A. G. (2016). Heat recovery of the exhaust gases from glass-worked furnaces using membrane pipes. Kyiv: Sofia-A. [In Russian].
4. Libertini, L., & Vicidomin, M. (2016). Exergetic Analysis of a Novel Solar Cooling System for Combined Cycle Power Plants Francesco Calise. *Entropy*, 18, 356. <https://doi.org/10.3390/e18100356>
5. 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. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74433>
6. 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*, 151, 681-692. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.028>

EXERGET EFFICIENCY OF DIFFERENT TYPE HEAT RECOVERERS FOR GLASSMAKING FURNACES

Ensuring the high efficiency of the exhaust gases heat recovery systems of glassmaking furnaces requires studying the exergy efficiency of the heat exchange equipment included in these systems. The work is devoted to the analysis of the exergy efficiency of heat recovery equipment of various types for these systems. The results of studies of exergy indicators of heat exchangers using two heat-transfer agents – water and air are presented. The design features of these heat exchangers and their modular design principle are presented. According to the designs of heat exchangers, the possibility of using the structural-modular principle by the analysis of the effectiveness of heat exchangers is determined. Exergy properties that reflect the essence of exergy methods: universonality and additivity, allowed in the analysis of efficiency to use a complex approach based on exergy analysis methods. Optimization problems for the investigated heat exchangers using the said methods in combination with statistical methods of experiment planning theory are solved. The calculation of exergy losses for separate parts (modules) of heat exchangers and for heat exchangers as a whole using the integrated balance method of exergy analysis was carried out. The target functions of optimization were the heat-exergy and exergy-technological efficiency criteria. The research results showed that both the exergy-technological and the heat-exergy efficiency for the water-heating heat exchanger are 1.1...1.2 times less than for the air-heating heat exchanger. This indicates a higher exergy efficiency of the water-heating equipment of heat recovery systems in comparison with air-heating. At the same time, water-heating heat exchangers allowing to increase the coefficient the use heat of fuel of furnace by 15...25 %, and air-heating heat exchangers by only 10...15 %. Despite the lower heat and exergy efficiency of water-heating heat exchangers, a number of important factors can determine their competitiveness in the heat recovery technologies of glassmaking furnaces. The advisability of using water- or air-heating equipment in heat recovery technologies is determined by many factors, the main of which is the need of a glass enterprise for the heat energy supplied with an appropriate heat-transfer agent, the seasonality of applying this heat-transfer agent, the technical possibility and economic efficiency of constructing a heat recovery system. The results of studies of the exergy efficiency of water-heating and air-heating heat exchangers can be used in the design of heat recovery technologies designed to heat water and air for various needs.

Keywords: heat recovery; efficiency; exergy methods; optimization.