

УДК 621.036.7

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ЕКСЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ РІЗНОГО ТИПУ В ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

Фіалко Н.М.¹, Степанова А.І.², Навродська Р.О.³, Шевчук С.І.⁴

¹член-кореспондент НАН України, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0002-9297-8473, e-mail: mbsh07@ukr.net

³канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-itff@ukr.net

⁴канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2023.7>

Наведено результати дослідження локальних ексергетичних втрат різного типу у системах утилізації теплоти відхідних газів котельних установок. Виконано класифікацію та порівняльний аналіз цих втрат для теплоутилізаційних систем різного призначення. Запропоновано умови найбільш ефективного зниження загальних ексергетичних втрат у системах утилізації відхідних газів шляхом зменшення локальних ексергетичних втрат першого та другого рівня.

The results of the study of local exergy losses of various types in systems for recovery the heat of waste gases from boiler plants are presented. The classification and comparative analysis of these losses for heat recovery systems for various purposes is carried out. The conditions for the most effective reduction of the total exergy losses in waste gas heat recovery systems by reducing the local exergy losses of the first and second levels are proposed.

Бібл. 10, табл.3, рис. 1.

Ключові слова: ексергетична ефективність; ексергетичні втрати; теплоутилізаційні системи.

c_p – питома теплоємність;

G – витрати теплоносіїв;

E – ексергія;

h – питома ентальпія;

q – потік теплоти;

N – продуктивність;

p – тиск;

R – універсальна газова стала;

S – поверхня;

s – питома ентропія;

T – абсолютна температура;

V – об'єм;

μ – молекулярна маса;

Δ – зміна величини;

λ – теплопровідність;

ρ – густина;

ζ – гідравлічний опір.

Верхні індекси:

$dг, вод, пов$ – димові гази, вода, повітря;

$сг$ – суміш газів;

$p1$ – перший рівень;

$p2$ – другий рівень;

$ст1$ – стінка з боку димових газів;

$ст2$ – стінка з боку повітря;

$\alpha1$ – коефіцієнт тепловіддачі від димових газів до стінки;

$\alpha2$ – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря.

Нижні індекси:

$втр$ – втрати;

$втр1 - втр5$ – втрати, пов'язані з тепловіддачею, теплопровідністю та гідравлічним опором теплоносіїв;

$вх, вих$ – вхід, вихід;

d – довкілля;

$дг1$ – димові гази, що пройшли теплоутилізатор;

$дг2$ – димові гази, що пройшли повз теплоутилізатор;

$нп$ – номінальна потужність.

Вступ

Для теплоенергетики України проблема енергозбереження значною мірою пов'язана із необхідністю підвищення ефективності всіх елементів енергетичних

установок. Важливим показником термодинамічної досконалості таких установок поряд із енергетичною ефективністю є ексергетична ефективність. Для теплоутилізаційних систем енергетичних установок

одним із основних критеріїв оцінки ексергетичної ефективності є величина ексергетичних втрат. Визначення в теплоутилізаційних системах максимальної кількості місць локалізації цих втрат, встановлення їх типу та відносного внеску у загальну ексергетичну ефективність системи дозволить спрямовано впливати на ексергетичні втрати з метою їхнього зниження, що забезпечить впровадження у енергетичне господарство України теплоутилізаційних систем із високими показниками ексергетичної ефективності. Це визначає важливість та актуальність досліджень в цьому напрямі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Наразі методи ексергетичного аналізу все частіше використовуються у світовій практиці для досліджень ефективності енергетичних установок різного типу. У роботі [1] викладено результати досліджень енергетичної та ексергетичної ефективності, які проведено з метою розвитку моделювання та підвищення продуктивності паливних елементів. Автори наукової праці [2] виконали енергетичні та ексергетичні дослідження системи газифікації вугілля, розробленої для виробництва водню та електроенергії. У роботі [3] наведено результати аналітичного та експериментального аналізу двох типів ексергетичних втрат, а саме, втрат, яких можна уникнути, та втрат, які залежать від ефективності та взаємозв'язку окремих елементів установки. Розглядалися системи опалення та гарячого водопостачання будинку з використанням конденсаційного котла. Автори публікації [4] відзначають, що використання ексергетичного підходу при розробці нових напрямів управління об'єктами теплоенергетики є важливим та перспективним для підвищення їх ефективності. Підвищенню ефективності таких важливих об'єктів теплоенергетики, як теплоутилізаційні системи енергетичних установок різного призначення, присвячено наукові праці [5–9]. Наразі вказана проблема потребує більш глибокого вивчення із застосуванням комплексних підходів, які включають методи ексергетичного аналізу в поєднанні з іншими сучасними методами дослідження. Комплексні методики ексергетичних досліджень дозволять встановити причини виникнення та області локалізації ексергетичних втрат у теплоутилізаційних системах, розрахувати зазначені втрати, проаналізувати вплив на них основних параметрів теплоутилізаційної системи та шукати можливості їх зниження.

Мета та завдання дослідження

Мета роботи – порівняльний аналіз ексергетичних втрат різного типу у теплоутилізаційних системах котельних установок, спрямований на підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено такі завдання:

- встановити місця локалізації і тип ексергетичних втрат у теплоутилізаційних системах різного призначення та провести їх класифікацію;
- отримати рівняння для розрахунку локальних ексергетичних втрат різного типу та визначити ці втрати;
- провести порівняльний аналіз ексергетичних втрат та визначити напрями підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем.

Методика проведення досліджень

У роботі використовувалася розроблена в ІТТФ НАНУ комплексна методика дослідження ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем, що ґрунтується на ексергетичному підході [8–10]. Методика включає структурно-варіантні та балансові методи ексергетичного аналізу, а також методи теорії теплопередачі та гідродинаміки у застосуванні до теплоутилізаційних систем. На основі структурно-варіантних методів дослідження розроблено структурні схеми теплоутилізаційних систем із зазначенням вхідних та вихідних ексергетичних потоків теплоносіїв. Аналіз структурних схем дозволив встановити місця локалізації ексергетичних втрат і провести їх класифікацію. За допомогою комплексної методики отримано рівняння для визначення локальних ексергетичних втрат першого і другого рівня. Розглядалися системи утилізації теплоти опалювального котла ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г) номінальною потужністю 2 МВт, що працює на природному газі.

Результати досліджень

Розглядалися теплоутилізаційні системи, які включають достатню кількість елементів, що дозволяє встановити типи і місця їх локалізації та провести класифікацію. Розглянуто теплоутилізаційну систему (рис.1 а) для нагрівання тепломережної води і дуттьового повітря. Для запобігання конденсації у газівідвідному тракті котельної установки в даній системі застосовується газопідігрівач, в якому відбувається підсушування вихідних димових газів завдяки їх підігріванню прямою водою котла. Розглянуто також теплоутилізаційну систему (рис.1 б), призначену для нагрівання тепломережної води, в якій реалізується підсушування вихідних газів шляхом підмішування до них частини байпасованих гарячих газів від котла. У цьому разі відбувається змішування теплоносіїв із різними термодинамічними характеристиками. Основними елементами теплоутилізаційних систем є

теплоутилізатори для підігрівання води, повітря та димових газів, елементи насосної системи, газоходи та система трубопроводів. Розроблено структурні схеми теплоутилізаційних систем, в яких відображено вхідні та вихідні ексергетичні потоки теплоносіїв між окремими елементами структури (рис. 1).

В теплоутилізаційній системі для нагрівання тепломережної води і дуттьового повітря ексергетичні втрати локалізуються в окремих елементах. В теплоутилізаційній системі з реалізацією процесу змішування теплоносіїв, крім втрат в окремих елементах, ексергетичні втрати локалізуються в газоході, який знаходиться за водогрійним теплоутилізатором. У газоході здійснюється змішування димових газів із різними термодинамічними параметрами з метою запобігання корозії газовідвідних трактів. На рис. 1б наведено схему основних елементів теплоутилізаційної системи, в якій реалізовано процес змішування димових газів різної температури, а саме, димових газів, які надходять у газохід безпосередньо від котла, і димових газів, які охолоджені в теплоутилізаторі. Проведено класифікацію локальних ексергетичних втрат. Локальні ексергетичні втрати, розрахунок яких може бути виконано за вхідними та вихідними термодинамічними па-

раметрами теплоносіїв, а саме, температури, тиску, витрат теплоносіїв, питомої теплоємності, молекулярної маси, віднесено до локальних ексергетичних втрат першого рівня. Розрахунок локальних ексергетичних втрат першого рівня дозволяє визначити втрати у місцях системи, в яких їх не можна визначити за допомогою вхідних та вихідних термодинамічних параметрів. Зазначені втрати можна розрахувати як різницю між загальними втратами теплоутилізаційної системи і сумарними локальними ексергетичними втратами першого рівня в елементах системи. При цьому загальні ексергетичні втрати в теплоутилізаційній системі можна розрахувати також використовуючи вхідні та вихідні термодинамічні параметри. В такий спосіб доцільно розрахувати ексергетичні втрати в системі трубопроводів, що з'єднують окремі елементи теплоутилізаційної системи. В системі трубопроводів найбільш зручно регулювати ексергетичні втрати з метою їх зниження для підвищення загальної ексергетичної ефективності теплоутилізаційної системи.

До локальних ексергетичних втрат другого рівня віднесено втрати, які виникають всередині окремих елементів теплоутилізаційної системи внаслідок незворотних процесів при теплообміні між теплоносіями,

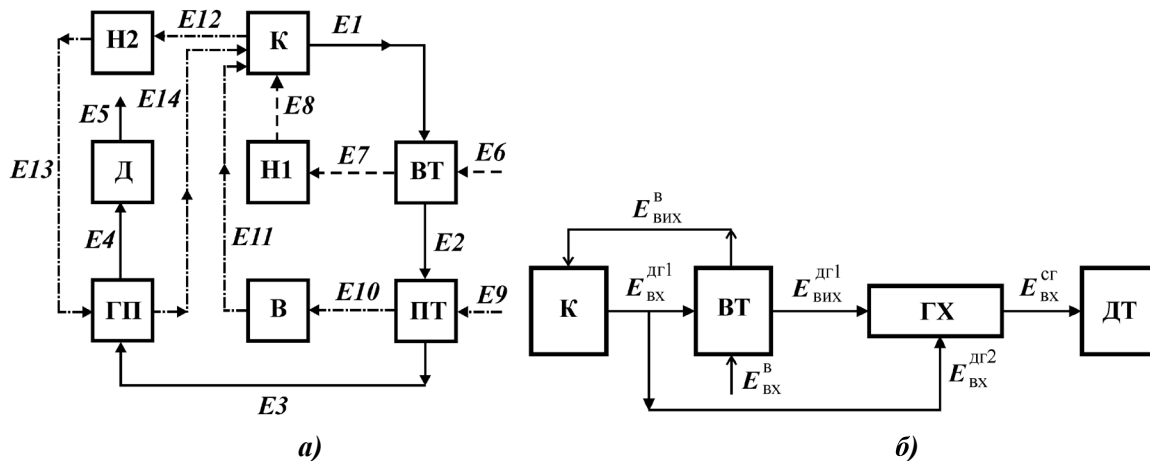


Рис. 1. Структурні схеми теплоутилізаційних систем:

а) – схема для нагрівання тепломережної води та дуттьового повітря;

б) – схема основних елементів теплоутилізаційної системи, в якій реалізовано процес змішування теплоносіїв із різними термодинамічними характеристиками:

K – котел; *VT* – водогрійний теплоутилізатор; *PT* – повітрогрійний теплоутилізатор; *GP* – газопідігрівач; *GX* – газохід; *D* – димосос; *DT* – димова труба; *V* – вентилятор; *H* – насоси;

$E_1 - E_5$ – вхідні та вихідні ексергетичні потоки димових газів;

$E_6 - E_8$ – вхідні та вихідні ексергетичні потоки води;

$E_9 - E_{14}$ – вхідні та вихідні ексергетичні потоки повітря

теплопровідності та під час руху теплоносіїв. Розрахунок локальних ексергетичних втрат другого рівня дозволяє визначити для окремого елемента теплоутилізаційної системи втрати в доквілля, як різницю між локальними ексергетичними втратами першого рівня в елементі системи та сумарними локальними ексергетичними втратами другого рівня в цьому елементі. Загальна система рівнянь для розрахунку локальних ексергетичних рівнянь першого рівня в теплоутилізаційних системах включає рівняння ексергетичних, теплових і матеріальних балансів:

$$\sum_i E_{BXi} - \sum_i E_{BIXi} + \sum_i E_{BT}^{p1} = 0,$$

$$\sum_i G_{BXi} - \sum_i G_{BIXi} = 0,$$

$$\sum_i G_{BXi} h_{BXi} - \sum_i G_{BIXi} h_{BIXi} = 0,$$

$$\Delta = E_{ex} - E_{vux},$$

$$E_{emp}^{p1} = \Delta^{\partial z} - \Delta^{nov},$$

$$E_{emp}^{p1} = \Delta^{\partial z} - \Delta^{6od},$$

$$E_{emp}^{p1} = \Delta^{cz} - \Delta^{\partial z},$$

$$E_{emp}^{p1} = (E_{ex}^{\partial z} - E_{vux}^{\partial z}) - (E_{vux}^{nov} - E_{ex}^{nov}),$$

$$E_{emp}^{p1} = (E_{ex}^{\partial z} - E_{vux}^{\partial z}) - (E_{vux}^{6od} - E_{ex}^{6od}),$$

$$E_{emp}^{p1} = (E_{ex}^{cz} - E_{vux}^{\partial z}) - (E_{ex}^{nov} - E_{vux}^{cz}),$$

$$E_{emp}^{p1} = (E_{ex}^{cz} - E_{vux}^{\partial z}) - (E_{ex}^{\partial z1} - E_{vux}^{cz}),$$

$$E^{\partial z} = G^{\partial z} c_p^{\partial z} T^{\partial z} - G^{\partial z} T_\delta (c_p^{\partial z} \ln T^{\partial z} - R \ln p^{\partial z} / \mu^{\partial z}),$$

$$E^{nov} = G^{nov} c_p^{nov} T^{nov} - G^{nov} T_\delta (c_p^{nov} \ln T^{nov} - R \ln p^{nov} / \mu^{nov}),$$

$$E^{6od} = G^{6od} (h^{6od} - T^{6od} s^{6od}),$$

$$E^{cz} = G^{cz} c_p^{cz} T^{cz} - G^{cz} T_\delta (c_p^{cz} \ln T^{cz} - R \ln p^{cz} / \mu^{cz}),$$

Ексергетичні втрати в системі трубопроводів:

$$E_{emp}^{cm} = E_{emp}^{mc} - \sum_i E_{empi}^{p1}.$$

На основі загальної системи рівнянь отримано рівняння для розрахунку локальних ексергетичних втрат першого рівня в елементах теплоутилізаційних систем. До прикладу наведено ексергетичне рівняння для розрахунку локальних ексергетичних втрат першого рівня у газоході при змішуванні димових газів з різними термодинамічними параметрами:

$$\begin{aligned} E_{emp}^{p1} = & G^{\partial z2} c_p^{\partial z2} T_{exGX}^{\partial z2} - G^{cz} c_p^{cz} T_{vuxGX}^{cz} - T_\delta G^{\partial z2} c_p^{\partial z2} \ln T_{exGX}^{\partial z2} + T_\delta G^{cz} c_p^{cz} \ln T_{vuxGX}^{cz} + \\ & + T_\delta G^{\partial z2} R / \mu^{\partial z2} \ln p_{exGX}^{\partial z2} - T_\delta G^{cz} R / \mu^{cz} \ln p_{vuxGX}^{cz} - G^{\partial z1} c_p^{\partial z1} T_{exGX}^{\partial z1} + \\ & + G^{cz} c_p^{cz} T_{vuxGX}^{cz} + T_\delta G^{\partial z1} c_p^{\partial z1} \ln T_{exGX}^{\partial z1} - T_\delta G^{cz} c_p^{cz} \ln T_{vuxGX}^{cz} - T_\delta G^{\partial z1} R / \mu^{\partial z1} \ln p_{exGX}^{\partial z1} + \\ & + T_\delta G^{cz} R / \mu^{cz} \ln p_{vuxGX}^{cz}. \end{aligned}$$

Рівняння для розрахунку локальних ексергетичних втрат другого рівня отримано для пластинчастого повітрогрійного теплоутилізатора. Для розрахунку ексергетичних втрат у теплоутилізаторі використовувалася математична модель, що включає диференціальне рівняння балансу ексергії:

$$E_{emp} = -T_0 \int_V \frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x_i} dV = T_0 \lambda \int_V \frac{1}{T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right)^2 dV$$

Рівняння для розрахунку локальних ексергетичних втрат другого рівня у пластинчастому повітрогрійному теплоутилізаторі:

$$\begin{aligned} E_1^{p2} &= T_0 P^2 / (\alpha_1 S^{cm1} T^{\Delta z} T^{cm1}), \\ E_2^{p2} &= T_0 P^2 / (\alpha_2 S^{cm2} T^{nov} T^{cm2}), \\ E_3^{p2} &= T_0 P^2 \delta^{cm} / (\lambda S T^{cm1} T^{cm2}), \\ E_4^{p2} &= (G^{\Delta z})^3 \zeta^{\Delta z} T_0 / [2 T^{\Delta z} (\rho^{\Delta z})^2 (S^{\Delta z})^2], \\ E_5^{p2} &= (G^{nov})^3 \zeta^{nov} T_0 / [2 T^{nov} (\rho^{nov})^2 (S^{nov})^2]. \end{aligned}$$

Ексергетичні втрати в доквілля:

$$E_{emp \Delta} = E_{emp ПТ}^{p1} - \sum_i E_{emp i}^{p2}$$

Розраховано локальні ексергетичні втрати першого рівня в елементах теплоутилізаційної системи та визначено відносний внесок кожного її елемента у сумарну величину ексергетичних втрат при різних значеннях відносної потужності котла (табл.1, табл.2).

Як видно з таблиць, значення ексергетичних втрат в теплоутилізаційній системі, а також значення локальних ексергетичних втрат першого рівня для всіх її елементів збільшуються протягом всього інтервалу зміни відносної потужності котла. Найменші ексергетичні втрати першого рівня спостерігаються у повітрогрійному теплоутилізаторі та у газопідігрівачі. На інтервалі зміни відносної потужності котла від 35 до 65% сумарні ексергетичні втрати першого рівня у насосній системі перевищують сумарні ексергетичні втрати у теплоутилізаторах та газопідігрівачі в 1,8 – 2,0 рази. Загалом у теплоутилізаційній системі та у водогрійному теплоутилізаторі на цьому інтервалі відбувається незначне збільшення ексергетичних втрат. Відносний внесок ексергетичних втрат першого рівня для водогрійного і повітрогрійного теплоутилізаторів в сумарні ексергетичні втрати в теплоутилізаційній системі на цьому інтервалі залишається приблизно на одному й тому ж рівні, дещо знижуючись для водогрійного і повітрогрійного теплоутилізаторів і підвищуючись для газопідігрівача. При збільшенні відносної потужності котла від 65 % до 95 % відносний внесок ексергетичних втрат першого рівня в сумарні ексергетичні втрати теплоутилізаційної системи для водогрійного теплоутилізатора починає різко зростати, відносні внески повітрогрійного теплоутилізатора знижуються в 1,7 разів, газопідігрівача – в 1,8 разів. Відносний внесок ексергетичних втрат насосної системи на цьому інтервалі дещо знижується в порівнянні з інтервалом

Таблиця 1. Результати розрахунку локальних ексергетичних втрат першого рівня в елементах теплоутилізаційної системи

Елементи теплоутилізаційної системи	Локальні ексергетичні втрати першого рівня E_{emp}^{p1} , кВт в елементах теплоутилізаційної системи при різних значеннях відносної потужності котла $P/P_{нп}$, %						
	35	45	55	65	75	85	95
Теплоутилізаційна система	6,0	7,6	10,0	15,0	20,0	29,5	38,5
Водогрійний теплоутилізатор	1,0	1,0	1,45	2,5	5,0	11,5	17,5
Повітрогрійний теплоутилізатор	1,0	1,0	1,2	1,6	1,7	2,0	2,4
Газопідігрівач	0,1	0,2	0,3	0,5	0,55	0,65	0,7
Димосос	1,2	1,9	2,65	3,5	4,6	5,6	6,7
Вентилятор	0,5	0,5	0,85	1,25	1,75	2,1	1,5
Насос 1	0,8	1,2	1,5	1,9	2,2	2,5	2,7
Насос 2	1,2	1,6	1,9	2,35	2,6	3,05	2,3
Система трубопроводів	0,2	0,2	0,15	1,4	1,5	2,1	2,3

Таблиця 2. Результати розрахунку відносних внесків локальних ексергетичних втрат першого рівня в загальні ексергетичні втрати теплоутилізаційної системи

Елементи теплоутилізаційної системи	Відносний внесок локальних ексергетичних втрат першого рівня $K, \%$ в загальні ексергетичні втрати в теплоутилізаційній системі при різних значеннях відносної потужності котла $P/P_{\text{нп}}, \%$						
	35	45	55	65	75	85	95
Водогрійний теплоутилізатор	16,7	13,2	14,5	14,7	25,0	39,0	45,5
Повітрогрійний теплоутилізатор	16,7	13,2	12,0	10,7	8,5	6,8	6,2
Газопідігрівач	1,7	2,6	3,0	3,3	2,8	2,2	1,8
Насосна система	61,7	68,4	69,0	60,0	56,0	44,9	40,5
Система трубопроводів	3,3	2,6	1,5	9,3	7,5	7,1	6,0

зміни відносної потужності котла від 35 % до 65 %. Загальний внесок ексергетичних втрат насосної системи в сумарні ексергетичні втрати першого рівня є досить значним, на інтервалі 35 – 75 % він значно перевищує сумарний внесок теплоутилізаторів та газопідігрівача і становить, в середньому, 63,0 %. Таким чином, найбільш ефективним для загального зниження ексергетичних втрат в теплоутилізаційній системі є зниження локальних ексергетичних втрат першого рівня в насосній системі.

На першому інтервалі зміни відносної потужності котла значення ексергетичних втрат в системі трубопроводів залишаються приблизно на одному рівні, на другому – зростають в 7–10 разів. Незважаючи на менші значення відносного внеску ексергетичних втрат системи трубопроводів в загальні ексергетичні втрати теплоутилізаційної системи, зниження їх локальних ексергетичних втрат є ефективним для загального зниження ексергетичних втрат.

Зміна ексергетичних втрат у повітрогрійному теплоутилізаторі, газопідігрівачі та теплонасосній системі відбувається лінійно на всьому інтервалі зміни потужності котла, Тангенс кута нахилу для залежностей $E_{\text{емп}}^{p1} = f(P/P_{\text{нп}})$ становить 0,01 для газопідігрівача, 0,02 для повітрогрійного теплоутилізатора, 0,09 для димососа та 0,05 для вентилятора. Для теплоутилізаційної системи та водогрійного теплоутилізатора залежності $E_{\text{емп}}^{p1} = f(P/P_{\text{нп}})$ складаються з двох ділянок, на кожній з яких відбувається лінійне збільшення ексергетичних втрат зі збільшенням відносної потужності котла. На першій ділянці зміни потужності котла від 35 до 55% відбувається повільне збільшення локальних ексергетичних втрат із зміною потужності котла. На цій ділянці тангенс кута нахилу для залежностей $E_{\text{емп}}^{p1} = f(P/P_{\text{нп}})$ становить 0,02 для водогрійного теплоутилізатора та 0,2 для теплоутилізаційної систе-

ми. Починаючи зі значень відносної потужності котла 55 – 60 %, відбувається різка зміна характеру залежностей $E_{\text{емп}}^{p1} = f(P/P_{\text{нп}})$ для водогрійного теплоутилізатора і теплоутилізаційної системи: локальні ексергетичні втрати першого рівня починають різко зростати. На цій ділянці тангенс кута нахилу для залежностей $E_{\text{емп}}^{p1} = f(P/P_{\text{нп}})$ становить 0,5 для водогрійного теплоутилізатора та 0,8 для теплоутилізаційної системи. Ступінь зміни локальних ексергетичних втрат у теплоутилізаційній системі на цьому інтервалі визначається, в першу чергу, локальними ексергетичними втратами водогрійного теплоутилізатора. На підставі сказаного оптимальним інтервалом значень відносної потужності котлоагрегату можна вважати інтервал 55 – 57 %.

Для визначення локальних ексергетичних втрат другого рівня використано методику, що поєднує структурно-варіантні методи, а також методи теорії теплопередачі та гідродинаміки у застосуванні до теплоутилізаційних систем. За допомогою зазначеної методики для окремого елемента теплоутилізаційної системи, а саме, повітрогрійного теплоутилізатора визначено локальні ексергетичні втрати другого рівня, пов'язані з процесами теплопередачі та з гідродинамічним опором під час руху теплоносіїв (табл. 3).

Локальні ексергетичні втрати внаслідок незворотних процесів при теплообміні між теплоносіями можна розділити на втрати при тепловіддачі від теплоносія до стінки теплоутилізатора, тепловіддачі від стінки до теплоносія та теплопровідності через стінку теплоутилізатора. Як видно з таблиці, локальні ексергетичні втрати другого рівня в повітрогрійному теплоутилізаторі для всіх типів втрат збільшуються зі збільшенням продуктивності теплоутилізатора.

Найбільші локальні втрати другого рівня пов'язано з тепловіддачею димових газів від стінки до повітря, вони

Таблиця 3. Результати досліджень локальних ексергетичних втрат другого рівня в повітрогрійному теплоутилізаторі

N , кВт	24,0	35,0	40,0	46,0	53,0	59,0	72,0
$E_{\text{втр}1}^{p2}$	0,95	1,80	1,90	2,60	2,90	3,75	5,00
$E_{\text{втр}2}^{p2}$	0,15	0,20	0,30	0,35	0,50	0,60	0,90
$E_{\text{втр}3}^{p2}$	1,30	2,65	2,70	4,00	4,20	5,60	7,70
$E_{\text{втр}4}^{p2}$	0,15	0,10	0,35	0,20	0,50	0,35	0,55
$E_{\text{втр}5}^{p2}$	0,10	0,10	0,25	0,10	0,35	0,15	0,30
$\sum_i E_{\text{втр}i}^{p2}$, кВт	2,65	4,85	5,50	7,25	8,45	10,45	14,50
$E_{\text{втр}IT}^{p1}$	2,75	5,8	5,85	9,0	9,0	12,1	16,3
$E_{\text{втр}д}^{p1}$, кВт	0,10	0,95	0,35	1,25	0,65	1,60	1,80

значно перевищують локальні ексергетичні втрати всіх типів втрат на всьому інтервалі зміни продуктивності. Ступінь зміни локальних ексергетичних втрат при зміні теплопродуктивності теплоутилізатора різна для різних типів втрат. Найбільше їх збільшення спостерігається при збільшенні продуктивності теплоутилізатора від 24 кВт до 72 кВт, що пов'язано також із втратами при тепловіддачі димових газів від стінки до повітря. Розраховано ексергетичні втрати у навколишнє середовище, як різницю між ексергетичними локальними втратами першого рівня в повітрогрійному теплоутилізаторі і сумарними локальними ексергетичними втратами другого рівня.

Найбільш ефективним для загального зниження локальних ексергетичних втрат другого рівня в повітрогрійному теплоутилізаторі є зниження втрат, пов'язаних з тепловіддачею від стінки до повітря.

Висновки

1. На основі аналізу розроблених структурних схем теплоутилізаційних систем різного призначення встановлено місця локалізації, типи локальних ексергетичних втрат у теплоутилізаційних системах та проведено їх класифікацію.

2. Отримано ексергетичні рівняння для розрахунку локальних ексергетичних втрат першого та другого рівнів та визначено ці втрати.

3. Встановлено, що найбільш ефективним для загального зниження ексергетичних втрат у теплоутилізаційній системі, що призначена для нагрівання зворотної тепломережної води та дуттьового повітря, на інтервалі зміни відносної потужності котла від 35 % до 65 % є зниження локальних ексергетичних втрат першого рівня у насосній системі.

4. На основі аналізу залежностей $E_{\text{втр}}^{p1} = f(P/P_{\text{нп}})$ встановлено факт різкого зростання ексергетичних втрат у водогрійному теплоутилізаторі та теплоутилізаційній системі при значеннях відносної потужності котла, приблизно, 55 %. З огляду на це доцільно вважати оптимальними значеннями відносної потужності котлоагрегата 55 – 57 %.

5. Встановлено, що найбільш ефективним для загального зниження ексергетичних втрат другого рівня в повітрогрійному теплоутилізаторі є зниження втрат, пов'язаних тепловіддачею від стінки до повітря.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Taner T.* Energy and exergy analyze of PEM fuel cell: A case study of modeling and simulations. *Energy*. 2018. №143. P.284-294.
2. *Seyitoglu SS., Dincer I., Kilicarslan A.* Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. № 42. P.2600.
3. *Picallo-Perez A., Sala J. M., Tsatsaronis G., Sayadi S.* Ad-vanced Exergy Analysis in the Dynamic Framework for As-sessing Building Thermal Systems. *Entropy*. 2019. vol. 22, no. 1, Dec. p. 32. doi: 10.3390/e22010032.
4. *Sangi R., Müller D.* Application of the second law of thermo-dynamics to control: A review, *Energy*. 2019. vol. 174, no. 1, May. pp. 938–953. doi: 10.1016/j.energy.2019.03.024.
5. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Meranova N., Sherenkovskii Ju.* 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. *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 1015587/1729.4061.2021/234026 ISSN 1729-3774 4061.2021/234026.

7. *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.

8. *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). С.61-63.

9. *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.

STUDY OF LOCAL EXERGETIC LOSSES OF DIFFERENT TYPES IN THE HEAT RECOVERY SYSTEMS OF BOILER PLANTS

Fialko N.¹, Stepanova A.², Navrodska R.³, Shevchuk S.⁴

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0001-9297-8473, e-mail: mbsh07@ukr.net

³PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2023.7>

The paper presents studies of local exergy losses of various types in heat recovery systems of boiler houses. The purpose of the work is a comparative analysis of local exergy losses of various types, aimed at increasing the exergy efficiency of heat recovery systems.

The main tasks of the work:

- determination of the location and type of exergy losses in heat recovery systems for various purposes and their classification;
- obtaining exergy equations for calculation and calculation of local exergy losses of various types;
- conducting a comparative analysis of exergy losses and identifying ways to increase the exergy efficiency of heat recovery systems.

Research methodology: The authors used a comprehensive methodology for studying the exergy efficiency of heat recovery systems based on the exergy approach, developed by the authors. The technique includes structural-variant

and balance methods of exergy analysis, as well as methods of heat transfer theory and hydrodynamics as applied to heat recovery systems.

Research results:

A classification of local exergy losses of various types has been carried out. Exergetic losses, which can be calculated from the input and output thermodynamic parameters of coolants, are referred to the losses of the first level. Exergy losses arising within individual elements of heat recovery systems as a result of irreversible processes during heat exchange between heat carriers are classified as losses of the second level. A system of equations has been developed for calculating local exergy losses of the first and second levels, and the corresponding exergy equations have been obtained. The calculation of local exergy losses of the second level for an air-heating heat exchanger was carried out for various values of the relative power of the boiler and the heat recovery efficiency of the heat exchanger. The conditions for the most effective reduction of total exergy losses in heat recovery systems by reducing local exergy losses of the first and second levels are substantiated. The results of the work can be used to design optimal heat recovery systems for boiler houses.

References 10, table 3, figures 1.

Keywords: exergy efficiency; local exergy losses; heat recovery systems.

1. *Taner T.* Energy and exergy analyze of PEM fuel cell: A case study of modeling and simulations. *Energy*. 2018. №143. P.284-294.
2. *Seyitoglu SS., Dincer I., Kilicarslan A.* Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. № 42. P.2600.
3. *Picallo-Perez A., Sala J. M., Tsatsaronis G., Sayadi S.* Ad-vanced Exergy Analysis in the Dynamic Framework for As-sessing Building Thermal Systems. *Entropy*. 2019. vol. 22, no. 1, Dec. p. 32. doi: 10.3390/e22010032.
4. *Sangi R., Müller D.* Application of the second law of thermo-dynamics to control: A review, *Energy*. 2019. vol. 174, no. 1, May. pp. 938–953. doi: 10.1016/j.energy.2019.03.024.
5. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Meranova N., Sherenkovskii Ju.* 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. *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 1015587/1729. 4061.2021/234026 ISSN 1729-3774 4061.2021/234026.

7. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Gnedash G., Shevchuk S.* Complex metods 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.

8. *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). С.61-63.

9. *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.

Отримано 11.05.2023

Received 11.05.2023

Прийнято до друку 15.08.2023

Accepted for publication 15.08.2023