

УДК 621.036.7

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ В ПЛАСТИНЧАСТИХ ТА ГЛАДКОТРУБНИХ ПОВІТРОГРІЙНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРАХ 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 Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: ntfialko@ukr.net

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

⁴канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 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/ttpe.3.2024.9>

Наведено результати дослідження ексергетичних втрат в процесах теплопередачі через плоску та циліндричну стінки в пластинчастому та гладкотрубному повітрогрійних теплоутилізаторах систем утилізації теплоти відхідних газів котельних установок. Запропоновано умови найбільш ефективного зниження у теплоутилізаторах ексергетичних втрат шляхом зменшення їх окремих типів.

The study results of exergy losses in the heat transfer processes through a flat wall and cylindrical wall in plate and smooth-tube air-heating exchangers of heat recovery systems for exhaust gases of boiler plants are presented. The conditions for the most effective reduction of exergy losses in heat recovery exchangers by reducing their individual types are proposed.

Бібл. 10, табл. 3, рис. 2.

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

E – ексергія;

Q – теплопродуктивність;

q – потік теплоти;

F – поверхня нагрівання;

r – радіус труб;

r_1, r_2 – зовнішній та внутрішній радіуси труб;

t – температура;

T – абсолютна температура;

T_0 – температура навколишнього середовища;

V – об'єм;

δ – товщина стінки;

α – коефіцієнт тепловіддачі;

λ – коефіцієнт теплопровідності.

Верхні індекси:

пл – пластина;

ц – циліндр.

Нижні індекси:

г, п – димові гази, повітря

втр – ексергетичні втрати;

вх – вхід;

вих – вихід;

втр_л, втр α_1 , втр α_2 – втрати при теплопровідності та тепловіддачі;

ст, г – стінка з боку димових газів;

ст, п – стінка з боку повітря.

Вступ

В умовах обмеженості первинних енергоресурсів та стійкої тенденції до підвищення вартості палива в країні проблема мінімізації енергоспоживання та раціонального використання енергоресурсів набуває все більшого значення. Один із способів вирішення цієї проблеми – підвищення ефективності теплоутилізаційного обладнання при використанні

технологій утилізації теплоти для енергетичних установок різного типу. Ексергетична ефективність теплоутилізаційного обладнання поряд із енергетичною ефективністю є суттєвим фактором термодинамічної досконалості всієї енергетичної установки. Проблеми підвищення ексергетичної ефективності установок потребують глибоких досліджень із використанням комплексних методик, які включа-

ють методи ексергетичного та термoeкономічного аналізу, статистичні методи планування експерименту, структурні, структурно-варіантні методи, методи багаторівневої оптимізації тощо. Обґрунтований вибір методики дослідження та аналіз на її основі ексергетичної ефективності теплоутилізаційного обладнання дозволяє оптимізувати конструкційні, технологічні та теплотехнічні параметри, що відповідають за ефективність теплоутилізаційних систем. Вказані дослідження сприяють розробці та впровадженню в енергетичне господарство України теплоутилізаційних систем із високими показниками ефективності. Це визначає важливість та актуальність представлених в роботі результатів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження ефективності енергетичних установок різного типу із використанням методик на основі ексергетичного підходу набуває все більшого поширення в світі. Автори публікації [1] відзначають, що використання ексергетичного підходу при розробці нових напрямів управління об'єктами теплоенергетики є важливим та перспективним для підвищення їх ефективності. В науковій праці [2] представлено результати досліджень енергетичної та ексергетичної ефективності паливних елементів, які проведено з метою підвищення їх продуктивності та розвитку процесів моделювання. Роботу [3] присвячено енергетичним та ексергетичним дослідженням системи газифікації вугілля, яка використовується для виробництва водню та електроенергії. У публікації [4] для систем опалення та гарячого водопостачання будинку з використанням конденсаційного котла проаналізовано ексергетичні втрати, яких можна уникнути, та втрати, які залежать від ефективності та взаємозв'язку окремих елементів установки. В роботі [5] ексергетичний аналіз застосовується для оцінки ефективності елементів енергетичних установок за різних температур навколишнього середовища. Але наразі комплексні методики дослідження ексергетичної ефективності установок базуються переважно на використанні методів термoeкономічного аналізу. Для підвищення ефективності енергетичних установок необхідні більш глибокі дослідження на основі ексерготехнологічного підходу. Комплексні методики на основі такого підходу можуть включати методи функціонального аналізу, теорії теплопередачі та інші сучасні методи дослідження [6 – 10]. Це дозволяє встановити причини виникнення та області локалізації ексергетичних втрат в енергетичних установках, розрахувати зазначені втрати, проаналізувати

вплив на них основних технологічних параметрів установки та шукати можливості зниження ексергетичних втрат, тобто підвищення ексергетичної ефективності.

Мета та завдання дослідження

Мета роботи – визначити напрями підвищення ексергетичної ефективності пластинчастих та гладкотрубних повітрогрійних теплоутилізаторів котельних установок шляхом встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів теплоутилізаторів на ексергетичні втрати в процесах теплопередачі. Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання:

- розробити комплексну методику розрахунку ексергетичних втрат у процесах теплопередачі через плоску і циліндричну стінки для повітрогрійних теплоутилізаторів та отримати відповідні залежності;
- на основі розробленої методики виконати розрахунки ексергетичних втрат різного типу, встановити закономірності впливу технологічних параметрів теплоутилізаторів на ексергетичні втрати та провести порівняльний аналіз втрат за різних технологічних параметрів;
- визначити напрями підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем, що включають пластинчасті та гладкотрубні повітрогрійні теплоутилізатори.

Методика проведення досліджень

В роботі розглядалися пластинчасті та гладкотрубні повітрогрійні теплоутилізатори, що входять до систем утилізації теплоти відхідних газів опалювального котла КСВа-2,0Г номінальною потужністю 2 МВт. Досліджено ексергетичні втрати, які обрано критеріями ексергетичної ефективності теплоутилізаторів. Розроблено комплексну методику розрахунку ексергетичних втрат, яка базується на ексерготехнологічному підході. При розробці методики використано системи інтегральних і диференціальних рівнянь, за допомогою яких отримано аналітичні залежності для розрахунку ексергетичних втрат в процесах теплопередачі через плоску та циліндричну стінки в повітрогрійних теплоутилізаторах.

Результати досліджень

Розглядалися поверхневі конденсаційні повітрогрійні теплоутилізатори, теплообмінна поверхня яких компонується із плоских пластин та пучків гладких труб при течії повітря всередині труб, а димових газів – в міжтрубному просторі. Товщина пластин з нержавіючої сталі становила 2 мм. Для трубних пучків використовувалися труби з зовнішнім

діаметром 31 мм і внутрішнім 25 мм. Критерієм ексергетичної ефективності теплоутилізаторів обрано ексергетичні втрати, для дослідження яких розроблено комплексну методику. Методика включає системи інтегральних рівнянь для розрахунку ексергетичних втрат і диференціальних рівнянь теорії теплопередачі. В рамках розробленої методики отримано аналітичні залежності для розрахунку ексергетичних втрат в процесах теплопровідності через плоску та циліндричну стінки, а також в процесах тепловіддачі від димових газів до плоскої та циліндричної стінок і тепловіддачі від стінок до повітря для пластинчастих та гладкотрубних повітрогрійних теплоутилізаторів. Далі наведено викладки для отримання величини ексергетичних втрат при теплопровідності через плоску стінку при граничних умовах першого роду:

$$E_{втр\lambda}^{nl} = -T_0 \int_V \frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x} dv = -T_0 \int_F \int_0^\delta dy dz \int_0^\delta \frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x} dx;$$

$$E_{втр\lambda}^{nl} = -T_0 F \int_0^\delta \frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x} dx;$$

$$E_{втр\lambda}^{nl} = T_0 F \lambda \int_0^\delta \left(\frac{dT}{dx} \right)^2 \frac{1}{T^2} dx;$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx};$$

$$T = T_{cm,\varepsilon} - \frac{T_{cm,\varepsilon} - T_{cm,n}}{\delta} x.$$

Введемо позначення:

$$T_{CT,\Gamma} = a, \quad T_{CT,\Pi} = b,$$

$$T_{CT,\Gamma} - T_{CT,\Pi} = c, \quad \frac{T_{CT,\Gamma} - T_{CT,\Pi}}{\delta} = p.$$

Тоді:

$$T = a - px \quad E_{втр\lambda}^{nl}$$

$$E_{втр\lambda}^{nl} = -T_0 F \lambda \int_a^{a-p\delta} \frac{p}{T^2} dT = T_0 F \lambda p \left. \frac{1}{T} \right|_a^{a-p\delta},$$

$$E_{втр\lambda}^{nl} = T_0 F \lambda p \left(\frac{1}{a-p\delta} - \frac{1}{a} \right),$$

$$E_{втр\lambda}^{nl} = \frac{T_0 F \lambda (T_{cm,\varepsilon} - T_{cm,n})^2}{\delta T_{cm,\varepsilon} T_{cm,n}}, \quad E_{втр}^{nl} = \frac{T_0 N^2 \delta}{\lambda F T_{cm,\varepsilon} T_{cm,n}}.$$

Подібні викладки проведено для розрахунку ексергетичних втрат при тепловіддачі від димових газів до плоскої стінки та від стінки до повітря і отримано відповідні залежності:

$$E_{втр,\alpha 1}^{nl} = \frac{T_0 N^2}{F \alpha_\varepsilon T_{cm,\varepsilon} T_{cm,n}}, \quad E_{втр,\alpha 2}^{nl} = \frac{T_0 N^2}{F \alpha_n T_{cm,\varepsilon} T_{cm,n}}.$$

Ексергетичні втрати при теплопровідності через циліндричну стінку при граничних умовах першого роду:

$$E_{втр\lambda}^u = -T_0 \int_V \frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial r} dv,$$

$$E_{втр}^u = -T_0 2\pi l \int_{r_1}^{r_2} r \left(\frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr,$$

$$E_{втр\lambda}^u = 2\pi l T_0 \lambda \int_{r_1}^{r_2} r \left(\frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 dr,$$

$$T = T_{cm,\varepsilon} - \frac{(T_{cm,\varepsilon} - T_{cm,n})}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1},$$

$$E_{втр\lambda}^u = \frac{2\pi l T_0 \lambda k \ln \frac{r_2}{r_1}}{T_{cm,\varepsilon} T_{cm,n}} = \frac{2\pi l T_0 \lambda (T_{cm,\varepsilon} - T_{cm,n})^2}{\ln \frac{r_2}{r_1} T_{cm,\varepsilon} T_{cm,n}},$$

$$E_{втр\lambda}^u = \frac{T_0 N^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \lambda l T_{cm,\varepsilon} T_{cm,n}}.$$

При тепловіддачі від димових газів до стінки:

$$E_{\text{втр}, \alpha 1}^{\text{д}} - T_{\text{д}} \int_v \frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial r} dv = -T_{\text{д}} \int_0^{2\pi} \int_0^l \int_{r_2}^{r_2+r_1} \frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial r} r dr$$

$$E_{\text{втр}, \alpha 1}^{\text{д}} = -2\pi l T_{\text{д}} \int_{r_2}^{r_2+r_1} \frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial r} r dr.$$

На невеликій відстані від поверхні циліндра $r < r_1$ приймаємо лінійний розподіл температур по радіусу:

$$T = \frac{(T_{\text{г}} - T_{\text{см}})}{r_1} r + T_{\text{см}};$$

$$E_{\text{втр}, \alpha 1}^{\text{д}} = -2\pi T_{\text{д}} l \alpha 1 \frac{(T_{\text{г}} - T_{\text{см}})}{r_1} \int_{r_2}^{r_2+r_1} \frac{r dr}{\left(\frac{T_{\text{г}} - T_{\text{см}}}{r_1} r + T_{\text{см}} \right)^2};$$

$$E_{\text{втр}, \alpha 1}^{\text{д}} = \frac{k}{a^2} \left[\frac{ar_1}{(ar_2 + ar_1 + b)(ar_2 + b)} + \ln \frac{ar_2 + ar_1 + b}{ar_2 + b} \right]$$

$$\text{де: } a = \frac{T_{\text{г}} - T_{\text{ст}}}{r_1}, \quad b = T_{\text{ст}}, \quad k = 2\pi a T_{\text{д}} l \alpha 1$$

Провівши певні спрощення, отримуємо формулу для розрахунку ексергетичних втрат при тепловіддачі від димових газів до циліндричної стінки та від стінки до повітря:

$$E_{\text{втр}, \alpha 1}^{\text{д}} = \frac{2T_{\text{д}} N^2 (r_1 + r_2)}{r_1 F \alpha 2 (T_{\text{а}} + T_{\text{в}})^2},$$

Подібні викладки проведено для тепловіддачі від стінки до повітря та отримано формулу для розрахунку ексергетичних втрат:

$$E_{\text{втр}, \alpha 2}^{\text{д}} = \frac{2N^2 T_{\text{д}} (r_1 + 2r_2)(r_1 + r_2)}{r_2^2 F \alpha 1 (T_{\text{г}} + T_{\text{в}})^2}.$$

За отриманими формулами розраховано ексергетичні втрати для розглянутих теплоутилізаторів. Основні вихідні дані, необхідні для розрахунків, представлено у таблицях 1 і 2. Розраховано ексергетичні втрати в процесах теплопровідності, тепловіддачі від димових газів до стінки та тепловіддачі від стінки до повітря для пластинчастих і гладкотрубних повітрогрієвих теплоутилізаторів. Ексергетичні втрати розраховано на вході та виході теплоутилізаторів при різних значеннях теплопродуктивності теплоутилізаторів для двох областей температури навколишнього середовища: від -20 °С до -5 °С та від 0 до 10 °С (табл. 3, рис. 1, 2). Різниця між значеннями ексергетичних втрат в процесах теплопровідності на вході та виході з теплоутилізаторів є незначною, тому в таблиці 3 наведено значення середніх ексергетичних втрат.

Як видно з таблиці 3 та рисунків, для всіх типів ексергетичних втрат, значення теплопродуктивності теплоутилізатора і температур навколишнього середовища значення ексергетичних втрат для гладкотрубного теплоутилізатора вище відповідних значень для пластинчастого теплоутилізатора. Так значення ексергетичних втрат при теплопровідності через стінку теплоутилізатора для гладкотрубного теплоутилізатора вище відповідних втрат для пластинчастого теплоутилізатора в середньому в 2,7 рази. Відповідні

Табл. 1. Вихідні дані для розрахунків ексергетичних втрат в пластинчастому теплоутилізаторі

Q , кВт	71,1	58,1	46,1	35,2	52,6	39,4	23,6
$T_{\text{д}}$, °С	-20	-15	-10	-5	0	5	10
F , м ²	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4
δ , м	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
$t_{\text{гх}}^{\text{н}}$, °С	-20	-15	-10	-5	0	5	10
$t_{\text{гх}}^{\text{в}}$, °С	65,8	64,3	62,3	59,8	63,4	60,4	55,2
$t_{\text{ст}}^{\text{г}}$, °С	156,8	145,5	133,2	120,0	130,8	116,5	95,3
$t_{\text{ст}}^{\text{в}}$, °С	84,0	78,1	71,6	64,5	76,7	69,0	57,9
λ , Вт/(м ² •°С)	29	29	29	29	29	29	29
$\alpha 1$, Вт/(м ² •°С)	48,1	43,6	38,9	34,2	47,9	42,2	33,1
$\alpha 2$, Вт/(м ² •°С)	60,1	55,7	51,5	47,6	60,8	55,8	48,8

значення при тепловіддачі від димових газів до стінки становлять 1,6 рази, а при тепловіддачі від стінки до повітря – 1,3 рази. Найменші втрати в теплоутилізаторах пов’язані з теплопровідністю, найбільші – з тепловіддачею від стінки до повітря. При підвищенні теплопродуктивності теплоутилізаторів ексергетичні

втрати всіх типів в обох областях температури навколишнього середовища збільшуються. В області зміни температури навколишнього середовища від -20 °С до -5 °С при втратах внаслідок теплопровідності для пластинчастого теплоутилізатора при збільшенні теплопродуктивності ексергетичні втрати збільшуються

Табл. 2. Вихідні дані для розрахунків ексергетичних втрат в Гладкотрубному теплоутилізаторі

Q , кВт	71,1	57,8	45,9	34,7	51,5	37,2	22,2
T_o , °С	-20	-15	-10	-5	0	5	10
F , м ²	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4
δ , м	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
t_{ax}^n , °С	29	29	29	29	29	29	29
t_{aux}^n , °С	66,0	64,0	62,1	59,1	62,3	57,6	52,5
t_{ax}^c , °С	156,8	145,5	133,2	120,0	130,8	116,5	95,3
t_{aux}^c , °С	84,2	78,7	72,1	65,5	78,0	71,8	59,0
λ , Вт/(м ² •°С)	29	29	29	29	29	29	29
α_1 , Вт/(м ² •°С)	38,4	34,7	30,9	27,1	37,6	33,2	26,0
α_2 , Вт/(м ² •°С)	98,0	89,3	85,1	76,8	91,5	69,4	61,7
L , м	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
$r1$, м	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
$r2$, м	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013

Табл. 3. Ексергетичні втрати в процесах теплопровідності для пластинчастого та гладкотрубного теплоутилізаторів

T_o , °С		-20 – -5				0 – 10		
Пластинчастий теплоутилізатор	Q , кВт	71,1	58,1	46,1	35,2	52,6	39,4	23,6
	$E_{втр,\lambda}^n$, кВт	0,025	0,015	0,010	0,0065	0,015	0,0085	0,003
Гладкотрубний теплоутилізатор	Q , кВт	71,1	57,8	45,9	34,7	51,5	37,2	22,2
	$E_{втр,\lambda}^c$, кВт	0,060	0,045	0,030	0,020	0,040	0,025	0,009

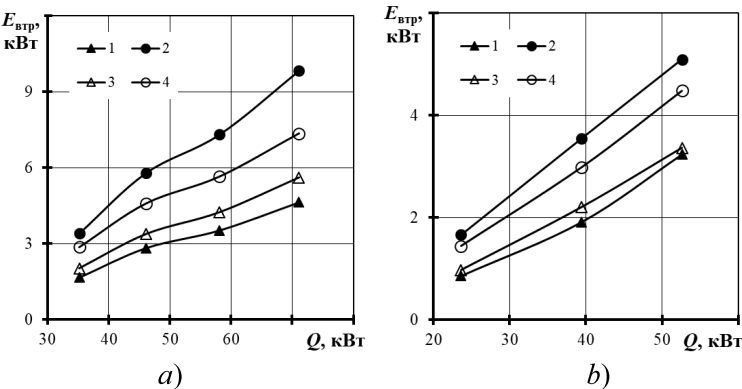


Рис. 1. Ексергетичні втрати на вході (1, 2) та на виході (3, 4) пластинчастого теплоутилізатора при різних значеннях теплопродуктивності: а) при T_o від -20 до -5 °С; б) при T_o від 0 до 10 °С: 1, 3 – тепловіддача від димових газів до стінки; 2, 4 – тепловіддача від стінки до повітря

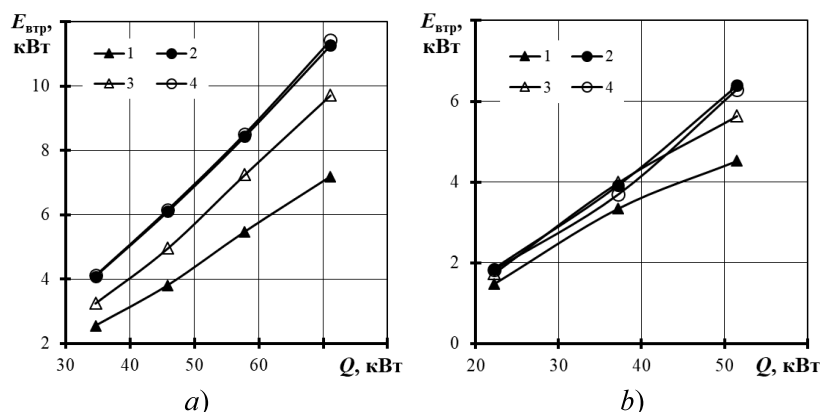


Рис. 2. Ексергетичні втрати на вході (1, 2) та на виході (3, 4) гладкотрубного теплоутилізатора при різних значеннях теплопродуктивності: а) при T_0 від -20 до -5 °C; б) при T_0 від 0 до 10 °C: 1, 3 – тепловіддача від димових газів до стінки; 2, 4 – тепловіддача від стінки до повітря

в 4 рази, при втратах внаслідок тепловіддачі від димових газів до стінки та від стінки до повітря, в середньому – у 2,7 рази. В області зміни температури навколишнього середовища від 0 до 10 °C відповідні значення становлять 8 і 3,3 рази. Отже при більших значеннях температури навколишнього середовища підвищення ексергетичних втрат на одиницю зміни теплопродуктивності є більш суттєвими. Подібні зміни ексергетичних втрат із зростанням теплопродуктивності мають місце також для гладкотрубного теплоутилізатора. Що стосується характеру зміни залежностей ексергетичних втрат від теплопродуктивності, то для всіх типів ексергетичних втрат і для різних областей температури навколишнього середовища він приблизно однаковий: криві являють собою практично лінійну залежність. Однак для гладкотрубного теплоутилізатора тангенс кута нахилу кривих до осі абсцис більший, ніж для пластинчастого теплоутилізатора: для ексергетичних втрат при теплопровідності, в середньому, в 2 рази, при тепловіддачі в середньому в 1,4 рази. Для всіх типів ексергетичних втрат для гладкотрубного і для пластинчастого теплоутилізатора в області зміни температури навколишнього середовища від -20 до -5 °C тангенс кута нахилу кривих до осі абсцис більше, ніж в області зміни температури навколишнього середовища від 0 до 10 °C. Що стосується різних типів втрат, то ексергетичні втрати при теплопровідності зростають дуже незначно в обох областях зміни температури зовнішнього середовища як для пластинчастого, так і для гладкотрубного теплоутилізаторів. Підвищення ексергетичних втрат при тепловіддачі від стінки до повітря на одиницю зміни теплопродуктивності є більш суттєвим, ніж при тепловіддачі від димових газів до стінки. Таким чином, для всіх типів ексергетичних втрат, для всіх значень теплопродуктивності теплоутилізатора

і температури навколишнього середовища ексергетична ефективність пластинчастого теплоутилізатора вища, ніж ексергетична ефективність гладкотрубного теплоутилізатора. При цьому для всіх значень теплопродуктивності теплоутилізатора найбільші ексергетичні втрати пов'язані з тепловіддачею від стінки до повітря. Для підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем необхідно насамперед знижувати ексергетичні втрати при тепловіддачі від стінки до повітря та максимально використовувати при глибокій утилізації теплоти пластинчасті теплоутилізатори різних типів.

Висновки

1. Для повітрогрійних теплоутилізаторів котельних установок розроблено комплексну методику розрахунку ексергетичних втрат у процесах теплопередачі через плоску і циліндричну стінки та отримано відповідні формули. Методика включає інтегральні рівняння для розрахунку ексергетичних втрат та диференціальні рівняння теорії теплопередачі у застосуванні до теплоутилізаційних систем.

2. Із використанням розробленої методики виконано розрахунки ексергетичних втрат різного типу у процесах теплопередачі для повітрогрійних теплоутилізаторів та проведено порівняльний аналіз ексергетичних втрат в теплоутилізаторах за різних технологічних параметрів.

3. Встановлено, що для всіх типів ексергетичних втрат, значення теплопродуктивності теплоутилізатора і температури навколишнього середовища значення ексергетичних втрат для гладкотрубного теплоутилізатора вище відповідних значень для пластинчастого теплоутилізатора. Для всіх значень теплопродуктивності теплоутилізатора найбільші ексергетичні втрати пов'язані з тепловіддачею від стінки до повітря.

4. Для підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем необхідно в першу чергу знижувати ексергетичні втрати при тепловіддачі від стінки до повітря та максимально використовувати пластинчасті теплоутилізатори.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Sangi R., Müller D.* Application of the second law of thermo-dynamics to control: A review. *Energy*. 2019. vol. 174, no. 1. pp. 938–953. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.024>
2. *Taner T.* Energy and exergy analyze of PEM fuel cell: A case study of modeling and simulations. *Energy*. 2018. №143. P.284–294.
3. *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.
4. *Picallo-Perez A., Sala J. M., Tsatsaronis G., Sayadi S.* Advanced 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.
5. *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>
6. *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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147526>
7. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Shevchuk S.* Comparative analysis of exergetic efficiency of methods of protection of gas exhaust tracks of boiler installations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 3/8 (111). 2021. P.42–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021/234026>
8. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Gnedash G., Shevchuk S.* Complex methods for analysis of efficiency and optimization of heat-recovery system. *Scientific and innovation*. 2021. 17(4). P.11-18. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.011>.
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). C.61–63.
10. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Meranova N.* Arget functions of optimization of heat recovery systems. *International scientific journal "Internauka"*. 2020. 1/3 (83). 23–27.

STUDY OF EXERGY LOSSES IN PLATE AND SMOOTH-TUBE AIR-HEATING EXCHANGERS 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 Kapnistst., 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 Kapnistst., 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 Kapnistst., 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 Kapnistst., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.9>

Abstract. The study results of exergy losses in the heat transfer processes through a flat wall and cylindrical wall in heat-recovery exchangers of recovery systems for heat of boiler plants exhaust gases are presented. We considered plate and smooth-tube air-heating heat recovery systems, which are included in the heat recovery systems of a heating boiler with a nominal capacity of 2 MW. The values of exergy losses were chosen as a criterion for the exergetic efficiency of heat recovery exchangers. The purpose of the work is to determine the directions for increasing the exergy efficiency of plate and smooth-tube air-heating heat exchangers of boiler plants by establishing the regularities of the technological parameters influence of heat exchangers on exergy losses in heat transfer processes. A complex methodology for calculating exergy losses in the heat transfer processes through flat wall and cylindrical wall has been developed for air-heating heat-recovery exchangers of boiler plants and the corresponding dependencies have been obtained. The methodology includes integral equations for

calculating exergy losses and differential equations of heat transfer theory when applied to heat recovery systems. The developed methodology was used to calculate of various types exergy losses in heat transfer processes for air-heating heat recovery exchangers and to conduct a comparative analysis of exergy losses in heat recovery exchangers with different technological parameters. It was established that for all types exergy losses, heating capacity values of heat recovery exchanger and ambient temperature, the exergy losses values for a smooth-tube heat recovery exchanger are higher than the corresponding values for a plate heat recovery exchanger. For all heating capacity values of heat recovery exchanger, the largest exergy losses are associated with heat transfer from the wall to the air. To increase the exergetic efficiency of heat utilization systems, it is necessary first of all to reduce exergetic losses during heat transfer from the wall to the air and to use plate heat exchangers as much as possible.

References 10, table 3, figures 2.

Key words: exergetic efficiency; exergy losses; heat recovery systems.

1. Sangi R., Müller D. Application of the second law of thermo-dynamics to control: A review. *Energy*. 2019. vol. 174, no. 1. pp. 938–953. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.024>
2. Taner T. Energy and exergy analyze of PEM fuel cell: A case study of modeling and simulations. *Energy*. 2018. №143. P.284–294.
3. 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.
4. Picallo-Perez A., Sala J. M., Tsatsaronis G., Sayadi S. Advanced Exergy Analysis in the Dynamic Framework for Assessing Building Thermal Systems. *Entropy*. 2019. vol. 22, no. 1, Dec. p. 32. <https://doi.org/10.3390/e22010032>
5. Zare V., Moalemi A. Parabolic trough solar collectors integrated with a Kalina cycle for high temperature applications. Energy, exergy and economic analyses. *Energy Conversion and Management*. 2017. 151. 681–692. [Link] <https://doi.org/j.enconman.2017.09.028>
6. 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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147526>.

7. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Shevchuk S.* Comparative analysis of exergetic efficiency of methods of protection of gas exhaust tracks of boiler installations Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 3/8 (111). 2021. P.42-49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021/234026> ISSN 1729-3774 4061.2021/234026.
8. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Gnedash G., Shevchuk S.* Complex methods for analysis of efficiency and optimization of heat-recovery system. Scientific and innovation. 2021. 17(4). P.11-18. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.011>.
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). P. 61–63.
10. *Fialko N., Stepanova A., Navrodska R., Meranova N.* Arget functions of optimization of heat recovery systems. International scientific journal "Internauka". 2020. 1/3 (83). 23–27.

Отримано 30.06.2024

Received 30.06.2024

Прийнято до друку 17.08.2024
Accepted for publication 17.08.2024