

УДК 621.036.7

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПОВІТРОНАГРІВАЧА ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ

*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. Ефективність систем теплоутилізації котельних установок характеризується рівнем втрат ексергетичної потужності в її елементах. Ці втрати пов'язані з нерівноважним теплообміном в системі, процесами теплопровідності, гідродинамічним опором при русі теплоносіїв. Мета роботи – на основі комплексної методики, побудованої на розрахунку дисипаторів ексергії, визначити закономірності впливу теплофізичних параметрів повітронагрівача теплоутилізаційної системи котельної установки на його ексергетичні втрати і встановити область параметрів повітронагрівача, у межах якої ці втрати мінімальні. У роботі використовується комплексна методика, побудована на розрахунку дисипаторів ексергії, яка дозволила диференціювати ексергетичні втрати відповідно до причин їхнього виникнення. На основі отриманих формул розраховано вказані втрати в повітронагрівачі теплоутилізаційної системи котельної установки та проаналізовано вплив на них основних теплофізичних параметрів повітронагрівача. Результати досліджень свідчать, що найбільші втрати ексергетичної потужності в повітронагрівачі пов'язані з тепловіддачею від димових газів до стінки та від стінки до повітря. Зі зменшенням теплопродуктивності котла ексергетичні втрати, що визначаються тепловіддачею, істотно знижуються, при цьому зменшення втрат, пов'язаних з теплопровідністю і рухом теплоносіїв, незначне. Проаналізовано закономірності зміни дисипаторів ексергії при зміні коефіцієнтів тепловіддачі. Збільшення коефіцієнтів тепловіддачі призводить до зростання втрат ексергетичної потужності, більш вираженого для тепловіддачі з боку повітря. При збільшенні коефіцієнтів тепловіддачі понад $0,040 \text{ кВт/м}^2\cdot\text{К}$ зазначені втрати починають істотно зростати. Визначено область основних характеристик повітронагрівача, в рамках якої забезпечується мінімальний рівень втрат ексергетичної потужності.

Ключові слова: котельні установки, ексергетичні втрати; дисипатори ексергії

Актуальність. Сучасні технології глибокої утилізації теплоти відхідних димових газів газоспоживальних котлів дозволяють підвищити теплову ефективність котельної установки і суттєво збільшити коефіцієнт використання теплоти палива. Результативність використання технологій підвищується у разі застосування для аналізу ефективності та оптимізації теплоутилізаційного устаткування комплексних підходів і розроблених на їхній основі методик. Такі методики включають методи ексергетичного аналізу у поєднанні з іншими сучасними методами дослідження.

Ефективність теплоутилізаційної системи значною мірою визначається рівнем втрат ексергетичної потужності в її елементах. Ці втрати пов'язані з процесами тепловіддачі, теплопровідності та гідродинамікою. Використовувана в роботі комплексна методика, побудована на розрахунку дисипаторів ексергії, дозволяє розраховувати вказані втрати у теплоутилізаційному устаткуванні та проаналізувати вплив на них його основних теплофізичних параметрів. Зважаючи на це, дослідження, представлені у роботі, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Підходи, побудовані на методах ексергетичного аналізу, достатньо результативні при аналізі ефективності енергетичних установок. Прикладами досліджень із застосуванням класу ексергетичних методів для аналізу ефективності установок можуть слугувати статті [1–4]. Так у роботі [1] для установки з виробництва водню з біомаси використовуються методи ексергетичного аналізу для оцінки як її загальної, так і ексергетичної ефективності. У [2] виконано ексергетичний аналіз ефективності абсорбційної холодильної машини і визначено змінні, які однозначно характеризують її продуктивність. Для визначення ефективності котельні в роботі [3] застосовувався балансовий метод ексергетичного аналізу, за допомогою якого розглядаються два основних види ексергетичних втрат, пов'язаних з незворотними процесами спалювання палива та теплопереносу. У роботі [4] на основі використання комплексного підходу, який включає методи ексергетичного аналізу,

отримані дані щодо ексергетичних втрат у повітрянагрівачі теплоутилізаційної системи котельної установки.

Однак, застосування вказаних методів не дозволяє диференціювати втрати ексергетичної потужності в досліджуваній системі за причинами їх виникнення та визначати області їхньої локалізації і найбільших втрат. Використання методики, побудованої на розрахунку дисипаторів ексергії, дає можливість здійснити вказане та шукати шляхи зниження ексергетичних втрат при зміні теплофізичних характеристик системи.

Мета дослідження – на основі комплексної методики, побудованої на розрахунку дисипаторів ексергії, визначити закономірності впливу теплофізичних параметрів повітрянагрівача теплоутилізаційної системи котельної установки на його ексергетичні втрати і встановити область параметрів повітрянагрівача, у межах якої ці втрати мінімальні.

Для досягнення вказаної мети було поставлено такі завдання:

– з використанням комплексної методики, побудованої на застосуванні методів ексергетичного аналізу у поєднанні з методами термодинаміки незворотних процесів, для повітрянагрівача теплоутилізаційної системи котельної установки з опалювальним котлом ВК-21-М2 (КСВа-2,0Г) розрахувати значення дисипаторів ексергії, пов'язаних з гідродинамікою, тепловіддачею і теплопровідністю, при різних режимах роботи котла;

– вивчити закономірності впливу теплофізичних параметрів повітрянагрівача на дисипатори ексергії та визначити області тих параметрів, у межах яких забезпечується мінімальний рівень втрат ексергетичної потужності.

Матеріали та методи дослідження. Проведено дослідження втрат ексергетичної потужності в пластинчатому повітрянагрівачі на основі розробленої методики розрахунку дисипаторів ексергії, пов'язаних з гідродинамічними втратами і втратами внаслідок нерівноважного теплообміну. Розроблена методика базується на застосуванні комплексного підходу, що поєднує ексергетичні методи з методами термодинаміки незворотних процесів.

Результати досліджень та їх обговорення.

Розрахунок дисипаторів ексергії, пов'язаних з гідродинамічними втратами, тепловіддачею та теплопровідністю, при різних режимах роботи котла

Розраховувались дисипатори ексергії для розглянутого повітрянагрівача. Розглядалось сім режимів роботи котла при різних навантаженнях (від максимальної до мінімальної) протягом опалювального періоду. При цьому враховувалось, що якщо по регламенту теплове навантаження котлів становить 50 % від номінального, здійснюється переведення відповідного числа котлів у номінальний режим при зменшенні загальної кількості котлів, що працюють.

Втрати ексергетичної потужності характеризувалися дисипаторами ексергії, для визначення яких використовувалось диференціальне рівняння ексергії:

$$\rho \frac{de}{dt} = -\operatorname{div}(\tau q) + P_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - T_{нс} q \cdot \operatorname{grad} \frac{1}{T} + \frac{T_{нс}}{T} P_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{dp}{dt}. \quad (1)$$

де e – питома ексергія, кДж/кг; P_{ij} – тензор в'язких напруг, кПа; p – тиск, кПа; q – тепловій потік, кВт; T – температура, К, °С; t – час, с; u – швидкість, м/с; τ – термодинамічна температура.

Дисипатори ексергії $R_{\alpha 1}, R_{\lambda}, R_{\alpha 2}$, пов'язані з процесами тепловіддачі та теплопровідності, визначались у результаті інтегрування третього доданку в правій частині рівняння (1) з використанням рівнянь для щільності теплового потоку від димових газів до стінки та від стінки до повітря, а також рівняння для щільності теплового потоку, обумовленого теплопровідністю через стінку. Ці дисипатори мають вигляд:

$$R_{\alpha_{дг}} = \frac{T_{нс} Q^2}{\alpha_{дг} F T_{дг} T_{ст1}}, R_{\lambda} = \frac{T_{нс} Q^2 \delta_{ст}}{\lambda_{ст} F T_{ст1} T_{ст2}}, R_{\alpha_{пов}} = \frac{T_{нс} Q^2}{\alpha_{пов} F T_{пов} T_{ст2}}, \quad (2)$$

де F – площа бокової поверхні, м²; Q – тепла потужність повітрянагрівача, кВт; q – тепловій потік, кВт; T – температура, К, °С; $T_{ст1}$ ($T_{ст2}$) – температура стінки з боку димових газів (повітря), К; t – час, с; α – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/м²·К; δ – товщина стінки, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, кВт/м·К; Індeksi верхні: вх, вих – вхід, вихід. Індeksi нижні: дг – димові гази; пов – повітря; нс – навколишнє середовище.

Вирази для дисипаторів ексергії, пов'язаних з гідродинамічними втратами, записуються так:

$$R_{G_{дг}} = \frac{(G_{дг})^3 \xi_{дг} T_{нс}}{2T_{дг}(\rho_{дг})^2 (F_{дг})^2}, R_{G_{пов}} = \frac{(G_{пов})^3 \xi_{пов} T_{нс}}{2T_{пов}(\rho_{пов})^2 (F_{пов})^2} \quad (3)$$

де G – вагова витрата теплоносія, кг/с; ξ – коефіцієнт гідравлічного опору; ρ – щільність, кг/м³.

Вихідні дані для розрахунків, що відповідають режимній карті котла ВК-21-М2, і результати визначення дисипаторів ексергії наведено в табл. 1.2.

Як видно з наведених даних, найбільші втрати ексергетичної потужності пов'язані з тепловіддачею від стінки до повітря та від димових газів до стінки. Більш детально за побудованими відповідними залежностями проаналізовано закономірності змінення дисипаторів ексергії при зміні коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{пов}$ і $\alpha_{дг}$ (рис. 1, 2).

1. Вихідні дані для визначення втрат ексергетичної потужності

Параметр	Режими роботи котла						
	1	2	3	4	5	6	7
Q , кВт	71,5	59,1	46,3	35,4	52,9	39,5	23,8
$T_{дг}^{вх}$, °С	156,8	145,5	133,2	120,0	130,8	116,5	95,3
$T_{дг}^{вих}$, °С	83,8	77,1	71,5	64,5	76,6	69,0	57,9
$T_{пов}^{вх}$, °С	-20,0	-15,0	-10,0	-5,0	0	5,0	10,0
$T_{пов}^{вих}$, °С	66,4	65,7	62,7	60,3	63,8	60,8	55,5
$T_{ст}^{вх}$, °С	100,45	100,56	100,67	100,77	100,44	100,60	100,79
$T_{ст}^{вих}$, °С	99,60	99,67	99,78	99,84	99,62	99,72	99,85
$G_{дг}$, кг/с	0,91	0,81	0,70	0,60	0,91	0,78	0,57
$G_{пов}$, кг/с	0,83	0,73	0,64	0,54	0,83	0,71	0,52
$\rho_{дг}^{вх}$, кг/м ³	0,823	0,846	0,872	0,901	0,877	0,909	0,962
$\rho_{дг}^{вих}$, кг/м ³	0,994	1,013	1,030	1,051	1,014	1,037	1,072
$\rho_{пов}^{вх}$, кг/м ³	1,395	1,368	1,342	1,317	1,293	1,270	1,248
$\rho_{пов}^{вих}$, кг/м ³	1,052	1,054	1,063	1,069	1,059	1,068	1,083
$\xi_{дг}$	0,0396	0,0404	0,0416	0,0431	0,0390	0,0403	0,0431
$\xi_{пов}$	0,0386	0,0396	0,0416	0,0434	0,0392	0,0408	0,0440

2. Результати розрахунків дисипаторів ексергії в повітрянагрівачі при різних режимах роботи котла

Параметр	Режими роботи котла						
	1	2	3	4	5	6	7
Q , кВт	71,5	59,1	46,3	35,4	52,9	39,5	23,8
$R_{\alpha_{дг}}$	4,96	3,80	2,69	1,86	2,85	1,88	0,91
$R_{\alpha_{пов}}$	7,66	5,61	4,05	2,70	4,17	2,66	1,26
R_{λ}	0,88	0,61	0,38	0,23	0,49	0,28	0,11
$R_{G_{дг}}$	0,52	0,37	0,24	0,15	0,49	0,31	0,13
$R_{G_{пов}}$	0,28	0,20	0,14	0,09	0,30	0,20	0,08

Вивчення закономірностей впливу на дисипатори ексергії теплофізичних параметрів повітрянагрівача та визначення областей його параметрів, в межах яких ексергетичні втрати мінімальні

Втрати ексергетичної потужності у повітрянагрівачі (табл.2, рис. 1, 2), що характеризуються дисипаторами ексергії $R_{\alpha_{дг}}$ і $R_{\alpha_{пов}}$, для всіх значень теплопродуктивності котла Q значно більші (у 5-25 раз) втрат ексергетичної потужності, що характеризуються дисипаторами R_{λ} , $R_{G_{дг}}$, $R_{G_{пов}}$. Зі зменшенням теплопродуктивності котла втрати ексергетичної потужності, що визначаються тепловіддачею від стінки до повітря та від димових газів до стінки, суттєво зменшуються (на 3-5 кВт), при цьому зменшення втрат, пов'язаних з теплопровідністю і рухом теплоносіїв, незначне.

Таким чином, найбільші втрати ексергетичної потужності пов'язані з тепловіддачею від стінки до повітря та від димових газів до стінки. Проаналізовано закономірності змінення дисипаторів ексергії, пов'язаних з тепловіддачею від стінки до повітря та від димових газів до стінки, при зміні коефіцієнтів тепловіддачі. Підвищення коефіцієнтів тепловіддачі призводить до росту втрат ексергетичної потужності, більш вираженому для тепловіддачі з боку повітря. Для вказаних дисипаторів ексергії їхній значний зріст починається зі значень коефіцієнтів тепловіддачі $0,040 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$.

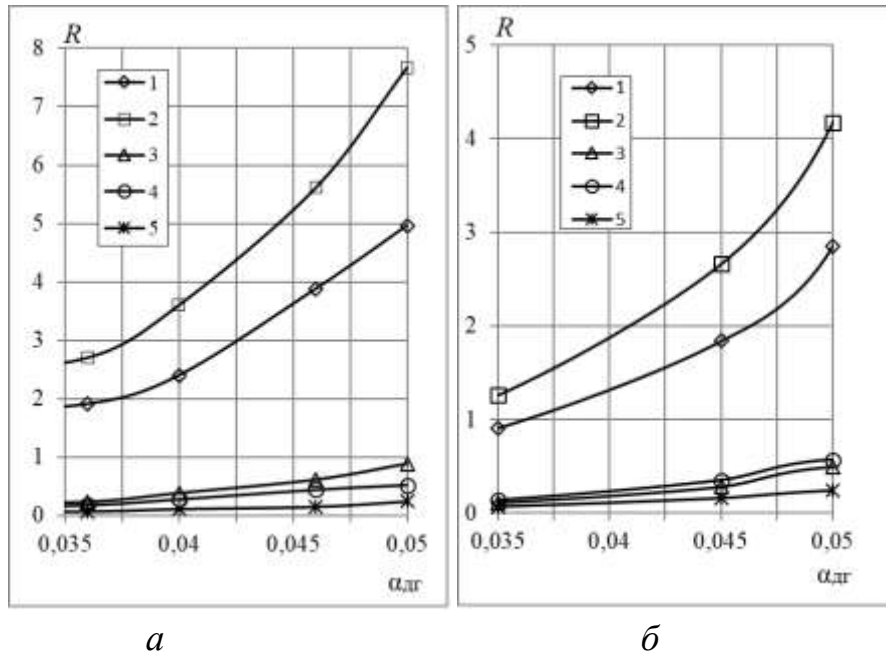


Рис. 1. Залежність дисипаторів ексергії R від коефіцієнта тепловіддачі з боку димових газів $\alpha_{дг}$:

а - режими 1-4; *б* - режими 5-7

1- $R\alpha_{дг}$; 2- $R\alpha_{пов}$; 3- $R\lambda$; 4- $R_{Gдг}$; 5- $R_{Gпов}$

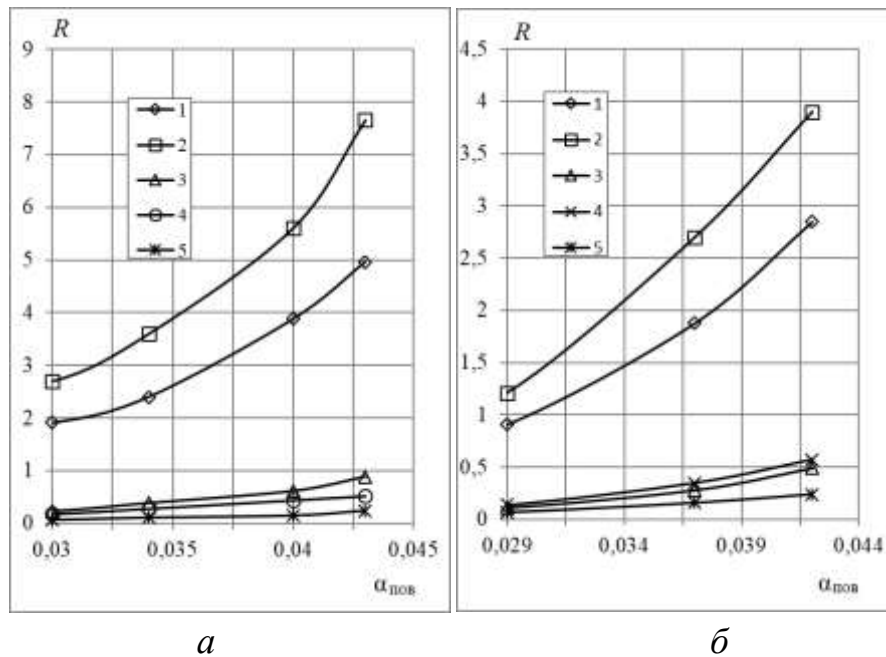


Рис. 2. Залежність дисипаторів ексергії R від коефіцієнта тепловіддачі з боку повітря $\alpha_{пов}$:

а - режими 1-4; *б* - режими 5-7

1- $R\alpha_{дг}$; 2- $R\alpha_{пов}$; 3- $R\lambda$; 4- $R_{Gдг}$; 5- $R_{Gпов}$

Застосований для розглянутого повітрянагрівача комплексний підхід, на відміну від альтернативних, дозволив розділити у цьому повітрянагрівачі втрати ексергетичної потужності з причин і областей їх локалізації та розрахувати втрати від теплопередачі, теплопровідності та гідродинамічні втрати. За допомогою отриманих формул для дисипаторів ексергії встановлені закономірності змінення вказаних втрат від теплопродуктивності котла Q і від коефіцієнтів тепловіддачі з боку димових газів $\alpha_{дг}$ і повітря $\alpha_{пов}$ при різних режимах роботи котла. Перевагою даного підходу порівняно з альтернативними є можливість застосування результатів досліджень для підвищення ефективності повітрянагрівача шляхом визначення області змінення теплофізичних і режимних параметрів, при яких рівень втрат ексергетичної потужності у повітрянагрівачі є мінімальним.

Отримані результати дозволили визначити область зміни коефіцієнтів тепловіддачі повітрянагрівача, в рамках якої забезпечується мінімальний рівень втрат ексергетичної потужності і, отже, максимальна ефективність. Ця область відповідає значенням $\alpha_{пов}$ і $\alpha_{дг}$ від 0,030 до 0,040 кВт/м²·К.

Висновки і перспективи.

1. За допомогою комплексної методики, побудованої на використанні методів ексергетичного аналізу, встановлено закономірності впливу теплофізичних параметрів повітрянагрівача теплоутилізаційної системи котла на втрати ексергетичної потужності.

2. Встановлено, що найбільші втрати ексергетичної потужності у повітрянагрівачі для всіх значень теплопродуктивності котла пов'язані з тепловіддачею від стінки до повітря та від димових газів до стінки.

3. Визначено область зміни коефіцієнтів тепловіддачі (от 0,030 до 0,040 кВт/м²·К) повітрянагрівача, в рамках якої забезпечується його максимальна ексергетична ефективність.

Список література

1. Hajjaji N., Pons M.-N., Houas A., Renaudin V. Exergy analysis: An efficient tool for understanding and improving hydrogen production via the steam methane

reforming process. Energy Policy. 2012. V. 42. P. 392-399. doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.003.

2. Cziesla F., Tsatsaronis G., Gao Z. Avoidable thermodynamic inefficiencies and costs in an externally fired combined cycle power plant. Energy. 2006. V. 31, Issues 10–11. P. 1472-1489. doi.org/10.1016/j.energy.2005.08.001

3. Yuan Yuan Jian, Shao Xiang Zhou. Exergy Analysis of Boiler Based on the Temperature Gradient. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2010. Paper # 11258018. P. 4. doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5449523.

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 (96). С.43-48.

References

1. Hajjaji, N., Pons, M.-N., Houas, A., Renaudin, V. (2012). Exergy analysis: An efficient tool for understanding and improving hydrogen production via the steam methane reforming process. Energy Policy, 42, 392-399. doi.org/10.1016/j.enpol.2011.12.003.

2. Cziesla, F., Tsatsaronis, G., Gao, Z. (2006). Avoidable thermodynamic inefficiencies and costs in an externally fired combined cycle power plant. Energy, 31 (10–11)/, 1472-1489. doi.org/10.1016/j.energy.2005.08.001.

3. Yuan Yuan Jian, Shao Xiang Zhou. (2010). Exergy Analysis of Boiler Based on the Temperature Gradient. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Paper # 11258018. P. 4. doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5449523.

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. East European Advanced Technology Journal, 6/8 (96), 43-48.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

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

Аннотация. Эффективность систем теплоутилизации котельных установок характеризуется уровнем потерь эксергетической мощности в ее элементах. Эти потери связаны с неравновесным теплообменом в системе, процессами теплопроводности, гидродинамическим сопротивлением при движении теплоносителей. Цель работы - на основе комплексной методике, построенной на расчете диссипаторов эксергии, определить закономерности влияния теплофизических параметров воздухонагревателя теплоутилизационных системы котельной установки на его эксергетические потери и установить область параметров воздухонагревателя, в рамках которой эти потери минимальны. В работе используется комплексная методика, построенная на расчете диссипаторов эксергии, которая позволила дифференцировать эксергетические

потери в соответствии с причинами их возникновения. На основе полученных формул рассчитаны указанные потери в воздухонагревателе теплоутилизационной системы котельной установки и проанализировано влияние на них основных теплофизических параметров воздухонагревателя. Результаты исследований свидетельствуют, что наибольшие потери эксергетической мощности в воздухонагревателе связаны с теплоотдачей от дымовых газов к стенке и от стенки к воздуху. С уменьшением теплопроизводительности котла эксергетические потери, определяемые теплоотдачей, существенно снижаются, при этом уменьшение потерь, связанных с теплопроводностью и движением теплоносителей, незначительно. Проанализированы закономерности изменения диссипаторов эксергии при изменении коэффициентов теплоотдачи. Увеличение коэффициентов теплоотдачи приводит к росту потерь эксергетической мощности, более выраженному для теплоотдачи со стороны воздуха. При увеличении коэффициентов теплоотдачи свыше $0,040 \text{ кВт/м}^2\cdot\text{К}$ указанные потери начинают существенно возрастать. Определена область основных характеристик воздухонагревателя, в рамках которой обеспечивается минимальный уровень потерь эксергетической мощности.

Ключевые слова: котельные установки, эксергетические потери; диссипаторы эксергии

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE AIR HEATER OF THE HEAT-RECOVERY SYSTEM BASED ON EXERGETIC ANALYSIS METHODS

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

Abstract. *The efficiency of the systems of thermal recovery of boiler plants is characterized by the level of loss of exergy power in its elements. These losses are due to the nonequilibrium heat exchange in the system, the processes of thermal conductivity, and the hydrodynamic resistance of the heat transfer media. The purpose of the work is based on the complex method based on the calculation of the exergy dispersers, to determine the laws of the influence of the thermo-physical parameters of the air heater of the heat recovery system of the boiler plant on its exergy losses and to establish the region of parameters of the air heater, within which these losses are minimal. In order to successfully solve this problem in the study of efficiency and optimization of heat recovery installations, it is necessary to use modern complex methods based on the application of exergy analysis methods in combination with other modern research methods. A well-grounded selection of techniques increases the effectiveness of research, which increases the efficiency of the heat recovery device. This is due to the fact that when designing a heat recovery device, it becomes possible to use parameters that are as close to optimal as possible. The efficiency of the elements of the heat recovery equipment of boiler plants is determined by the level of exergy losses. The indicated losses are related to the nonequilibrium heat exchange in the system, the processes of thermal conductivity, the hydrodynamic resistance in the movement of heat carriers. To calculate the exergy losses in the heater of the heat recovery system of the boiler plant, a complex method based on the calculation of dissipation of exergy is used. The technique allowed to divide the exergy*

losses in accordance with the causes of their occurrence. Exergy losses were calculated using the appropriate formulas for the calculation of exergy dissipators, and the influence of the basic thermophysical parameters of the heater was analyzed on them. The greatest exergy losses in the heater are associated with the heat transfer processes in the system. As the boiler's heat output decreases, the exergy losses determined by the heat transfer are significantly reduced, with a decrease in the losses associated with the thermal conductivity and the heat transfer media movement. The regularities of the change of dissipation of exergy with changes in heat transfer coefficients are analyzed. The increase in the coefficients of heat transfer leads to an increase in the loss of exergy power, which is more pronounced for the heat transfer from the air. With increasing heat transfer coefficients above $0.040 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$, these losses begin to increase significantly. The area of the main characteristics of the heater is determined, within which a minimum level of exergy power loss is ensured.

Key words: *boiler plants; exergy losses; dissipation of exergy*