

УДК 621.036.7

БАГАТОРІВНЕВА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

Фіалко Н.М.¹, Степанова А.І.², Шевчук С.І.³, Сбродова Г.О.⁴, Мартюк О.В.⁵

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: nmfialko@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, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁴канд. фіз-мат. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук. співр., доцент, orcid.org/0000-0002-2539-1146, e-mail: galsb@ukr.net

⁵мол. наук. співроб., Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, e-mail: martiuk.o76@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2025.4>

Наведено результати дослідження багаторівневої оптимізації режимних і конструкційних параметрів теплоутилізаційної системи з водогрійним конденсаційним теплоутилізатором. Запропоновано методику дослідження, яка включає блок-схему і схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації. Методика дозволяє звести загальні задачі оптимізації теплоутилізаційної системи до більш простих узгоджених локальних оптимізаційних задач кожного рівня оптимізації.

The study results of the multi-level optimization of the operating and structural parameters of a heat recovery system with a water-heating condensing heat-recovery exchanger are presented. A research methodology is proposed, which includes a block diagram and a scheme for recursive bypass of optimization levels. The methodology allows to reduce the general optimization tasks of a heat recovery system to simpler coordinated local optimization problems of each optimization level.

Бібл. 10, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: теплоутилізаційна система, багаторівнева оптимізація; ексергетичні методи.

c_p – питома теплоємність;

G – витрати теплоносіїв;

E – ексергетична потужність;

i – питома ентальпія;

k – коефіцієнт теплопередачі;

Q – теплова потужність;

N – потужність;

m – маса;

p – тиск;

R – універсальна газова стала;

S – поверхня;

s – питома ентропія;

T – абсолютна температура;

T_0 – температура довкілля;

V – об'єм;

μ – молекулярна маса;

Δ – зміна величини.

Верхні індекси:

дг, в – димові гази, вода;

внут – внутрішній.

Нижні індекси:

втр – втрати;

вх, вих – вхід, вихід;

п – пластина;

тр – труба;

p_0 – тиск довкілля.

Вступ. В останні роки за наявності в нашій країні екологічних проблем та проблем, пов'язаних з підвищенням вартості палива, дослідженню, розробці і впровадженню екологоефективних енергозберігальних технологій приділяється велика увага. Утилізація

теплоти відхідних газів теплоенергетичних установок є одним з важливих факторів економії паливних і матеріальних ресурсів в енергетиці. Наразі дослідження ефективності та оптимізація теплоутилізаційних систем провадяться, як правило, із використанням одно-

го з методів аналізу (енергетичного, ексергетичного, економічного чи іншого). Це не дозволяє під час розробки теплоутилізаційних систем аналізувати роботу установок з різних позицій та використовувати параметри максимально наближені до оптимальних. Створення ефективних технологій утилізації теплоти та рішення про доцільність реалізації тієї чи іншої утилізаційної схеми мають базуватись на використанні комплексних методик, які включають ексергетичні методи, методи функціонального аналізу, теорії теплопровідності тощо. Такі дослідження дозволяють виявити шляхи зниження ексергетичних втрат у теплоутилізаційних системах та підвищення їх ексергетичної ефективності. В Україні наявний достатньо високий по-тенціал для впровадження високоефективних технологій утилізації скидної теплоти, що визначає важливість та актуальність досліджень, що провадяться в цій галузі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Наразі при дослідженні ефективності енергетичних установок різного призначення все більше поширення у світі посідають методики на основі ексергетичного підходу. Так у роботі [1] методи ексергетичного аналізу використовуються для оцінки ексергетичних втрат в елементах системи опалення та гарячого водопостачання будівлі, оснащеної конденсаційним котлом. У роботі [2] для встановлення зв'язку ексергетичних втрат в елементах багатфункціональної будівлі використано балансові методи ексергетичного аналізу. Найчастіше комплексні методики дослідження ексергетичної ефективності установок базуються на використанні методів ексергоекономіки та термoeкономічного аналізу. Більш глибокі дослідження на основі ексерготехнологічного підходу можуть включати методи ексергетичного аналізу, теорії лінійних систем, теорії теплопровідності, функціонального аналізу та інші. У роботах [3–10] комплексні методики на основі ексерготехнологічного підходу використовуються для аналізу та оптимізації систем утилізації теплоти енергетичних установок. Дослідження сучасних теплоутилізаційних систем ускладнено необхідністю урахування великої кількості режимних, технологічних та теплотехнічних параметрів, відповідальних за ефективність таких систем. Необхідність розширення вказаних досліджень на основі нових сучасних комплексних методик визначається необхідністю забезпечення високоефективної роботи теплоутилізаційних систем різного призначення. Глибоке вивчення цих проблем дозволить виявити шляхи підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем та отримати необхідну інформацію для проєктування оптимальних теплоутилізаційних схем.

Мета та завдання дослідження. Мета роботи – підвищення ексергетичної ефективності теплоутилізаційної системи з водоگрійним конденсаційним теплоутилізатором шляхом багаторівневої оптимізації режимних, технологічних та теплотехнічних параметрів. Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання:

- відповідно до принципів багаторівневої оптимізації розробити блок-схему оптимізації та схему рекурсивного обходу цих рівнів для теплоутилізаційної системи;
- розробити математичні моделі для оптимізації параметрів кожного рівня запропонованої системи;
- на основі розроблених математичних моделей для об'єктів кожного рівня вирішити відповідні оптимізаційні задачі та визначити оптимальні значення параметрів.

Методика проведення досліджень. Розглядалась теплоутилізаційна система опалювальної котельної установки з водогрійним теплоутилізатором, призначеним для нагрівання зворотної тепломережної води шляхом охолодження димових газів система оснащена підігрівачем охолоджених газів прямою водою котла для запобігання конденсації в газопровідних каналах установки (рис. 1). В деяких режимах котла (за умов зниження початкової температури води нижче 50 °С) реалізується конденсаційний режим роботи теплоутилізатора. Теплообмінні поверхні теплоутилізатора і газопідігрівача компонувались із оребрених труб зі сталеву основою і алюмінієвим оребренням. Температури зворотної та прямої води котла відповідали тепломережному графіку з перепадом температур теплоносія 25 °С та розрахунковою температурою повітря -20°С. Температура димових газів за котлом в номінальному режимі становила 166 °С.

Для отримання оптимальних режимних і конструкційних параметрів теплоутилізаційної системи використано методику багаторівневої оптимізації, яка дозволяє звести загальні задачі оптимізації до більш простих узгоджених локальних оптимізаційних задач кожного рівня оптимізації. При цьому, змінними параметрами слугують параметри об'єкта даного рівня, а постійними параметрами є оптимальні параметри, які є результатами вирішення локальних оптимізаційних задач інших рівнів. Це дозволяє здійснювати постійний інформаційний обмін між рівнями оптимізації, що збільшує точність отриманих результатів.

Результати досліджень. Основні принципи багаторівневої оптимізації енергетичних установок:

- розділити енергетичну установку на кілька рівнів оптимізації;

- для об'єктів кожного рівня визначити цільові функції оптимізації та змінні параметри;
- розробити блок-схему багаторівневої оптимізації та схему рекурсивного обходу рівнів;
- визначити цільові функції та параметри оптимізації для різних рівнів оптимізації;
- розробити математичні моделі для оптимізації параметрів об'єктів кожного рівня;
- отримати функціональні залежності цільових функцій оптимізації від режимних і конструкційних параметрів об'єктів кожного рівня, використовуючи змінними параметрами параметри об'єкта даного рівня,

а постійними – оптимальні параметри, які є результатами вирішення локальних оптимізаційних задач для об'єктів інших рівнів;

- використовувати схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації і визначити оптимальні значення параметрів установки.

Відповідно до принципів багаторівневої оптимізації теплоутилізаційна система поділена на п'ять рівнів, для кожного з яких визначено цільові функції та параметри, що підлягають оптимізації (таблиця 1).

Із використанням методів ексергетичного аналізу розроблено математичні моделі для кожного рівня

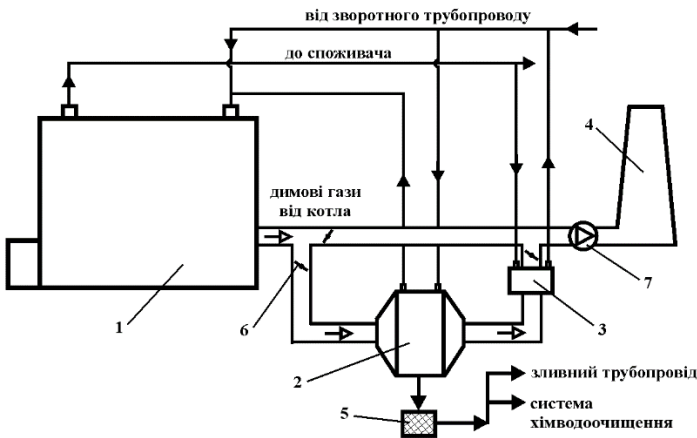


Рис. 1. Принципова схема теплоутилізаційної установки: 1 – котел; 2 – конденсаційний теплоутилізатор; 3 – газопідігрівач; 4 – димова труба; 5 – нейтралізатор; 6 – шибер; 7 – димосос
Fig. 1. Schematic diagram of a heat recovery unit: 1 - boiler; 2 - condensing heat recovery exchanger; 3 - gas heater; 4 - chimney; 5 - neutralizer; 6 - gate valve; 7 - smoke exhauster

Табл. 1. Цільові функції та параметри оптимізації для різних рівнів оптимізації теплоутилізаційної системи
Table 1. Objective functions and optimization parameters for different levels of heat recovery system optimization

Рівень оптимізації	Цільова функція оптимізації	Параметри оптимізації
Утилізаційна система	Енергетичний Критерій Кирпичова $k=Q/N$	Режимні характеристики: середня швидкість димових газів та води, температура димових газів на вході.
Газопідігрівач	Тепло-ексергетичний критерій $\varepsilon= E_{\text{втр}}/Q$	Геометричні параметри теплообмінної поверхні: висота ребра, товщина ребра, міжреберний крок.
Конденсаційний теплоутилізатор	Тепло-ексергетичний критерій $\varepsilon= E_{\text{втр}}/Q$ Ексерго-технологічний критерій $k_{\text{ex}}^T = E_{\text{втр}} m/Q^2$: Питома матеріалоемність $m_0 = m/Q$	Режимні характеристики: відношення початкового та кінцевого вологовмісту димових газів, відношення чисел Рейнольдса димових газів та води. Масогабаритні характеристики: маса, об'єм, висота теплообмінної поверхні.
“Суха” та “мокра” зони теплоутилізатора	Тепло-ексергетичний критерій $\varepsilon= E_{\text{втр}}/Q$	Геометричні параметри теплообмінної поверхні: висота ребра a , товщина ребра b , міжреберний крок s .

оптимізації, блок-схему багаторівневої оптимізації та схему рекурсивного обходу рівнів, яка дозволяє здійснювати постійний інформаційний обмін між рівнями оптимізації (рис. 2).

На кожному рівні оптимізації за допомогою відповідних математичних моделей визнача-

лись оптимальні значення параметрів. При побудові математичної моделі для кожного рівня оптимізації змінними параметрами використано параметри об'єкта даного рівня, а постійними параметрами – оптимальні параметри, які є результатами вирішення локальних оптимізаційних задач інших рівнів.

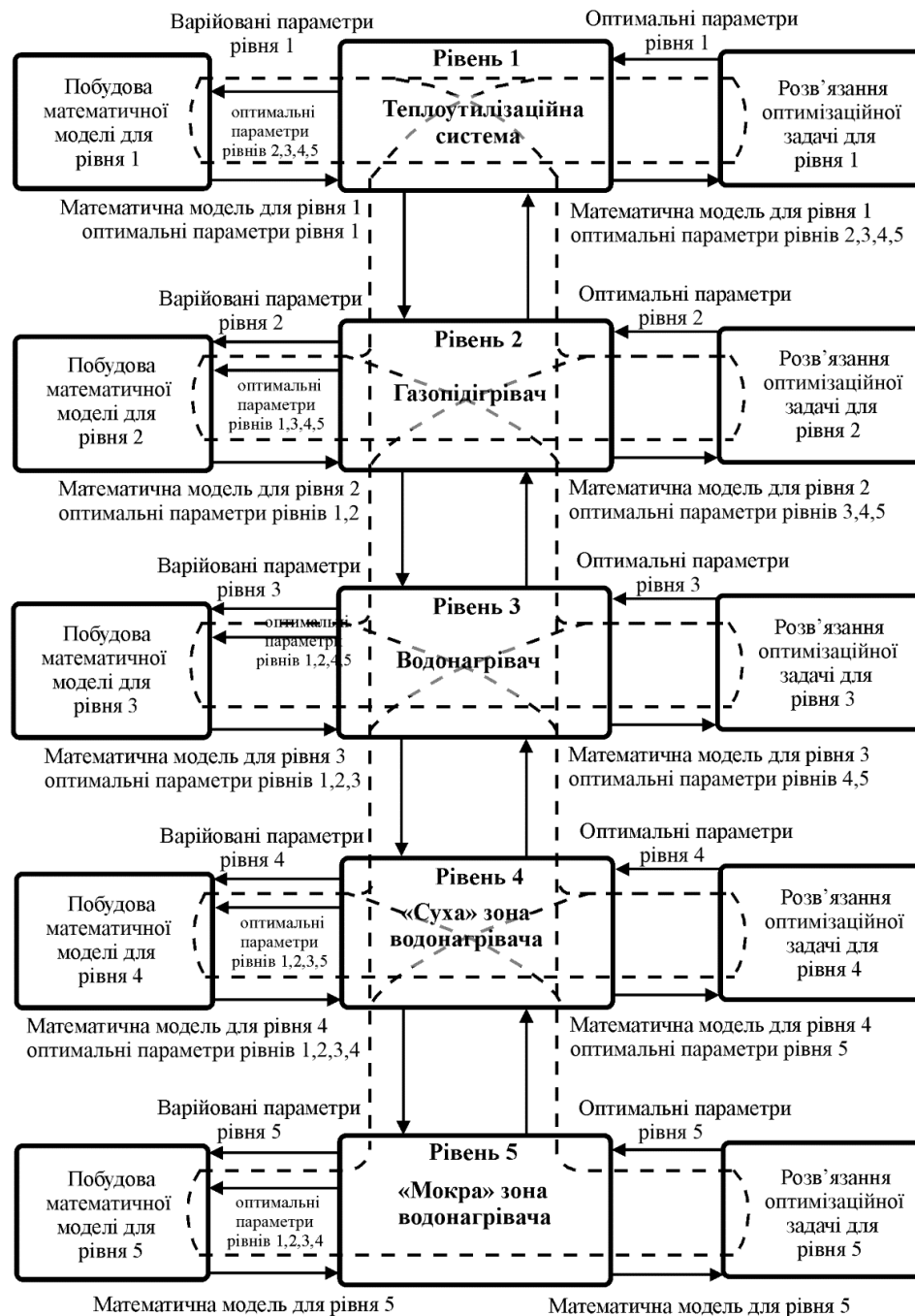


Рис. 2. Блок-схема багаторівневої оптимізації системи з водогрійним конденсаційним теплоутилізатором та газопідігрівачем (пунктирною лінією позначено схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації)

Fig. 2. Block diagram of the multi-level optimization with a water-heating condensing heat-recovery exchanger and a gas heater (the dotted line indicates the scheme for recursive bypass of optimization levels)

Для побудови математичних моделей використовувались наступні методи:

- Статистичні методи планування експерименту, які дозволяють визначити функціональну залежність цільової функції оптимізації від основних параметрів системи у вигляді поліномів різного ступеня.
- Ексергетичні балансові методи, які дозволяють отримати функціональну залежність цільової функції оптимізації від основних параметрів системи для певного типу теплоутилізаційної установки на основі системи ексергетичних, теплових та матеріальних балансових рівнянь. Система рівнянь може бути доповнена відповідними гідродинамічними рівняннями та рівняннями теплопередачі.
- Матричні методи ексергетичного аналізу, які передбачають розробку системи ексергетичних, теплових та матеріальних балансових рівнянь у матричній формі.
- Варіантні та структурно-варіантні методи ексергетичного аналізу, які дозволяють проводити оптимізацію складної теплоутилізаційної системи на основі оптимізації її окремих елементів, зміна ексергетичних втрат у яких найбільше впливає на зміну ефективності системи в цілому.

Далі наведено до прикладу отримані на основі статистичних методів планування експерименту функціональні залежності тепло-ексергетичного та ексерго-технологічного критеріїв ефективності від геометричних параметрів газопідігрівача у вигляді поліномів другого ступеня:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 3,80 \cdot 10^{-1} - 2,72 \cdot 10^{-4} a + 1,19 \cdot 10^{-7} a^2 - 4,41 \cdot 10^{-6} b + 2,43 \cdot 10^{-9} ab + \\ &+ 3,77 \cdot 10^{-9} b^2 + 3,88 \cdot 10^{-2} s - 1,63 \cdot 10^{-5} as - 2,63 \cdot 10^{-6} bs + 1,67 \cdot 10^{-4} s^2; \\ k_{\text{ВХ}}^T &= 8,29 - 1,64 \cdot 10^{-2} a + 7,67 \cdot 10^{-6} a^2 - 2,28 \cdot 10^{-5} b + 4,93 \cdot 10^{-7} ab + \\ &+ 2,77 \cdot 10^{-8} b^2 + 2,45s - 1,15 \cdot 10^{-3} as - 1,77 \cdot 10^{-4} bs + 1,41 \cdot 10^{-2} s^2.\end{aligned}$$

З використанням балансових методів ексергетичного аналізу розроблено системи ексергетичних, теплових та матеріальних балансових рівнянь, доповнених відповідними гідродинамічними рівняннями та рівняннями теплопередачі для різних рівнів теплоутилізаційної системи. Наведено систему балансових рівнянь та залежності тепло-ексергетичного критерію ефективності від вхідних та вихідних параметрів системи. Отримані формули дозволяють за необхідності врахувати вологовміст димових газів та його зміну в процесі проходження димових газів через теплоутилізаційну систему.

$$\sum_{j=1}^n N_j + E_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} + E_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}} - E_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}} - E_{\text{ВИХ}}^{\text{ВОД}} - E_{\text{ВТР}}^{\text{ВНУТ}} = 0;$$

$$G^{\text{ДГ}} i^{\text{ДГ}} - G^{\text{ВОД}} i^{\text{ВОД}} = 0;$$

$$\sum_{j=1}^n G_{j\text{ВХ}} - \sum_{j=1}^n G_{j\text{ВИХ}} = \text{const},$$

$$G^{\text{ДГ}} c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}) - k^{\text{ДГ}} \Delta T F_{\text{П}} = 0;$$

$$G^{\text{ВОД}} c_{\text{рсп}}^{\text{ВОД}} (T_{\text{ВИХ}}^{\text{ВОД}} - T_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) - k^{\text{ВОД}} \Delta T F_{\text{ТР}}^{\text{ВНУТ}} = 0;$$

$$E_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - E_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}} = G^{\text{ДГ}} \left[c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 \left(c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} \ln \frac{T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{T_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ДГ}}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{p_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}} \right) \right];$$

1. За умов, коли вологовмістом димових газів можна знехтувати:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= G^{\text{ДГ}} / Q \left[c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 \left(c_{\text{рсп}}^{\text{ДГ}} \ln \frac{T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{T_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ДГ}}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{p_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}} \right) \right] - \\ &- G^{\text{ВОД}} / Q \left[(i_{\text{ВИХ}}^{\text{ВОД}} - i_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) - T_0 (s_{\text{ВИХ}}^{\text{ВОД}} - s_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) \right].\end{aligned}$$

2. У разі постійного вологовмісту димових газів при проходженні через теплоутилізаційну систему:

$$\varepsilon = G^{\text{ДГ}} / Q \left[c_p^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 \left(c_p^{\text{ДГ}} \ln \frac{T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{T_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ДГ}}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{p_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}} \right) \right] +$$

$$+ G^{\text{ДГ}} d / Q \left[(i_{\text{РВХ}}^{\text{ДГ}} - i_{\text{РВИХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 (s_{\text{РВХ}}^{\text{ДГ}} - s_{\text{РВИХ}}^{\text{ДГ}}) \right] - G^{\text{ВОД}} / Q \left[(i_{\text{ВИХ}}^{\text{ВОД}} - i_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) - T_0 (s_{\text{ВИХ}}^{\text{ВОД}} - s_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) \right].$$

3. За умов зміни вологовмісту димових газів при проходженні теплоутилізаційної системи, що реалізується у разі конденсації на теплообмінній поверхні теплоутилізатора наявної в газах водяної пари:

$$\varepsilon = G^{\text{ДГ}} / Q \left[c_p^{\text{ДГ}} (T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - T_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}) - T_0 \left(c_p^{\text{ДГ}} \ln \frac{T_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}}}{T_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ДГ}}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\text{ДГ}} - \varphi_{\text{ВХ}} p_s(T_{\text{ВХ}})}{p_{\text{ВИХ}}^{\text{ДГ}} - \varphi_{\text{ВИХ}} p_s(T_{\text{ВИХ}})} \right) \right] +$$

$$+ G^{\text{ДГ}} d_{\text{ВХ}} / Q \left[(i_{\text{РВХ}}^{\text{ДГ}} - i_{\text{Р0}}^{\text{ДГ}}) - T_0 (s_{\text{РВХ}}^{\text{ДГ}} - s_{\text{Р0}}^{\text{ДГ}}) \right] - G^{\text{ДГ}} d_{\text{ВИХ}} / Q \left[(i_{\text{РВИХ}}^{\text{ДГ}} - i_{\text{Р0}}^{\text{ДГ}}) - T_0 (s_{\text{РВИХ}}^{\text{ДГ}} - s_{\text{Р0}}^{\text{ДГ}}) \right] -$$

$$- G^{\text{ВОД}} / Q \left[(i_{\text{ВИХ}}^{\text{ВОД}} - i_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) - T_0 (s_{\text{ВИХ}}^{\text{ВОД}} - s_{\text{ВХ}}^{\text{ВОД}}) \right].$$

При використанні матричних методів ексергетичного аналізу застосовувався метод RP -представлення термодинамічних балансів у матричній формі, за допомогою якого проводиться порівняльний аналіз втрат ексергетичної потужності у різних її елементах, визначається відносний внесок кожного елемента у сумарну незворотність установки.

Баланси маси, енергії та ексергії:

$$AM = 0,$$

$$AH = 0;$$

$$AE = E_{\text{втр}}.$$

Властивості матриць в RP -представленні термодинамічних балансів:

$$A = A_R - A_P A_R;$$

$$E = R; A_P E = P;$$

$$R - P = E_{\text{втр}},$$

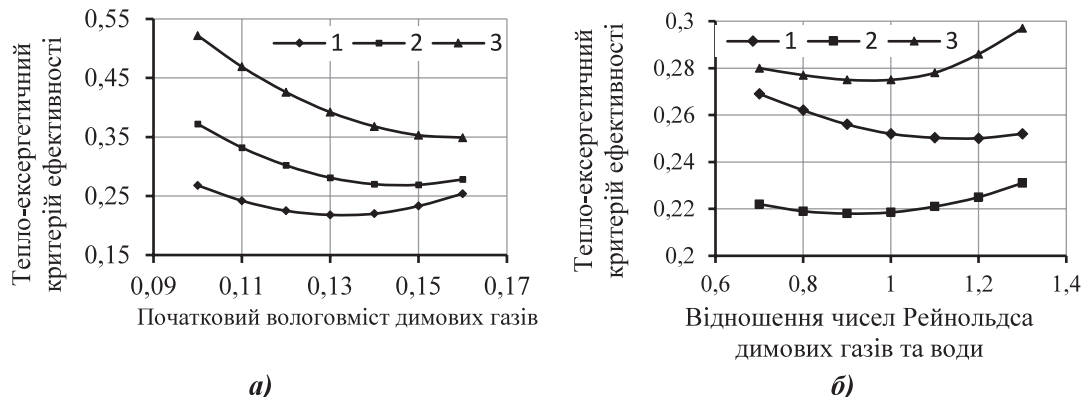


Рис. 3. Залежність тепло-ексергетичного критерія від початкового вологовмісту димових газів та відношення чисел Рейнольдса димових газів і води для конденсаційного теплоутилізатора:

a) $1 - Re^{\text{ДГ}}/Re^{\text{вод}} = 0,04$; 2 – 0,06; 3 – 0,08; b) $1 - d_{\text{вх}} = 0,16$ кг/кг с.г.; 2 – 0,13; 3 – 0,10

Fig. 3. Dependence of the heat-exergy criterion on the initial exhaust gases moisture content and the ratio of the exhaust gas Reynolds numbers and water for a condensing heat recovery exchanger:

a) $1 - Re^g/Re^w = 0,04$; 2 – 0,06; 3 – 0,08; b) $1 - d_{\text{in}} = 0,16$ kg/kg d.g.; 2 – 0,13; 3 – 0,10

де A – повна вхідна матриця; A_R – матриця джерел; A_P – матриця продуктів; $M, H, E, R, P, E_{втр}$ – стовпці, що містять відповідно потоки маси, потоки енергії, ексергію потоків маси, ексергію джерел, ексергію продуктів, ексергетичні втрати.

До прикладу, для деяких рівнів оптимізації наведено результати (рис. 3, 4) отриманих залежностей цільових функцій від режимних і геометричних параметрів досліджуваного конденсаційного теплоутилізатора.

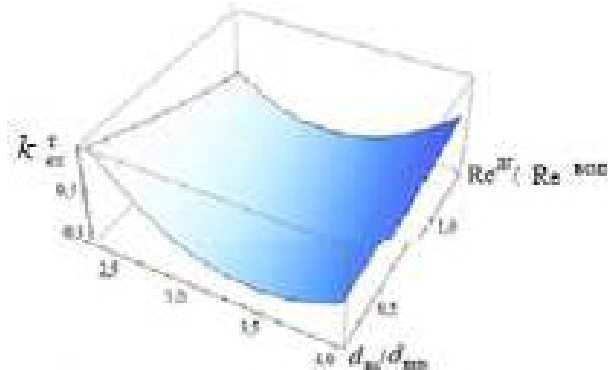


Рис.4. Залежність ексерго-технологічного критерія від відношення початкового і кінцевого вологовмісту димових газів та відношення чисел Рейнольдса димових газів і води для конденсаційного теплоутилізатора
Fig. 4. Dependence of the exergy-technological criterion on the ratio of the exhaust gases initial and final moisture content and the ratio of the exhaust gas Reynolds numbers and water for a condensing heat recovery exchanger

Табл. 2. Результати розрахунків оптимальних параметри теплоутилізаційної системи
Table 2. Calculations results of optimal parameters of the heat recovery system

Рівень	Змінні параметри	Позначення	Оптимальні параметри
Теплоутилізаційна система	Середня швидкість димових газів	v^{gr} , м/с	8,0...10,0
	Середня швидкість води	v^b , м/с	0,9...1,1
	Температура димових газів на вході	t^{gr} , °C	50...70
	Відношення початкового і кінцевого вологовмісту димових газів	$d_{вх}/d_{вих}$	2,9...3,1
Газопідігрівач	Висота ребра	h , м	0,007...0,009
	Товщина ребра	b , м	0,0004...0,0005
	Міжреберний крок	s , м	0,0025...0,003
Конденсаційний теплоутилізатор (водонагрівач)	Маса теплообмінної поверхні	m , кг	$5 \cdot 10^3$
	Об'єм теплообмінної поверхні	V , м ³	1,0
	Висота теплообмінної поверхні	H , м	0,8
	Відношення початкового і кінцевого вологовмісту димових газів	$d_{вх}/d_{вих}$	1,5...2,0
	Відношення чисел Рейнольдса димових газів і води	Re^{gr}/Re^b	0,5...0,9
“Суха” зона конденсаційного теплоутилізатора	Висота ребра	h , м	0,01...0,02
	Товщина ребра	b , м	0,0004...0,0006
	Міжреберний крок	s , м	0,003...0,004
“Мокра” зона конденсаційного теплоутилізатора	Висота ребра	h , м	0,01...0,03
	Товщина ребра	b , м	0,0004...0,0006
	Міжреберний крок	s , м	0,004...0,005

Застосування теплоутилізаційної системи з отриманими оптимальними значеннями режимних та конструкційних параметрів дозволять підвищити коефіцієнт використання палива котла на 5...8%.

Наведено результати розрахунків оптимальних параметрів теплоутилізаційної системи (табл. 2).

Висновки.

1. Для котельної установки із застосуванням конденсаційного водогрійного теплоутилізатора та газопідігрівача запропоновано методику багаторівневої оптимізації режимних та конструкційних параметрів, яка дозволяє звести загальне завдання оптимізації до більш простих узгоджених локальних оптимізаційних завдань кожного рівня.

2. Теплоутилізаційна система розділена на п'ять рівнів оптимізації. Розроблено блок-схему багаторівневої оптимізації та схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації, що дозволяє здійснювати постійний інформаційний обмін між рівнями оптимізації. Для конденсаційного теплоутилізатора розглядалися два рівні оптимізації, які включають "суху" та "мокру" зони поверхні теплообміну.

3. Для кожного рівня оптимізації обрано методи побудови математичних моделей, запропоновано критерії оцінки ексергетичної ефективності та варійовані параметри. Критеріями ефективності обрано енергетичний критерій Кирпичова, тепло-ексергетичний та ексерго-технологічний критерії. При розрахунку критеріїв враховувалася зміна вологовмісту газів у "мокрій" зоні теплоутилізатора.

4. При побудові математичної моделі кожного рівня змінними параметрами слугували параметри об'єкта цього рівня, а постійними – оптимальні параметри, які є результатом вирішення локальних оптимізаційних задач інших рівнів.

5. Для побудованих в такий спосіб математичних моделей на кожному рівні оптимізації вирішено відповідні оптимізаційні задачі та визначено оптимальні значення режимних та конструкційних параметрів конденсаційного водогрійного теплоутилізатора та газопідігрівача.

6. З використанням схеми рекурсивного обходу рівнів оптимізації визначено оптимальні параметри теплоутилізатора, що дозволяє підвищити коефіцієнт використання теплоти палива котла на 5...8 %.

ЛІТЕРАТУРА

1. *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, doi: 10.3390/e22010032.

2. *Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T.* "Splitting the dynamic exergy destruction within a building energy system in-to endogenous and exogenous parts using measured data from the building automation system", *Int. J. Energy Res.* 2020, vol. 44, no. 6, Feb., pp. 4395–4410, doi: 10.1002/er.5213.

3. *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. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.147526.

4. *Степанова, А.И.* Анализ работоспособности установки с комбинированной теплоутилизационной системой для подогрева воды и дутьевого воздуха котлоагрегата. *Промислова теплотехніка*, 2016. №38(4). С. 38-46. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2016.06>.

5. *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 10.15587/1729.4061.2021/234026 ISSN 1729-3774 4061.2021/234026.

6. *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/science17.04.011.

7. *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. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-15>

8. *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. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-12>

9. *Фіалко Н.М., Степанова А.І., Навродська Р.О., Шевчук С.І.* Дослідження ексергетичних втрат в пластинчастих та гладкотрубних повітрогрійних теплоутилізаторах котельних установок. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 2024. №46(3), С. 82-90. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.3.2024.9>

10. *Фіалко Н., Степанова А., Навродська Р., Меранова Н., Шевчук С.* Вплив технологічних параметрів на ексергетичну ефективність повітрянагрівача теплоутилізаційної системи котельної установки. *Енергетика і автоматика.* 2024. №1. С. 5–14. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya3\(73\).2024.005](http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(73).2024.005)

MULTI-LEVEL OPTIMIZATION OF HEAT RECOVERY SYSTEM PARAMETERS OF BOILER PLANTS

Fialko N.¹, Stepanova A.², Shevchuk S.³, Sbrodova G.⁴, Martiuk O.⁵

Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03680, Ukraine

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

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

³*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com*

⁴*PhD (Phys. & Math.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, Associate Professor, orcid.org/0000-0002-2539-1146, e-mail: galsb@ukr.net*

⁵*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Junior Researcher, e-mail: martiuk.o76@gmail.com*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.4>

The results of multi-level optimization of the operating and structural parameters of the heat recovery system of a heating boiler plant with a water-heating heat-recovery exchanger designed to heat return heat-network water are presented. The boiler plant is equipped with a heater of cooled flue gases by direct boiler water to prevent condensation in its gas exhaust channels. In the performance of optimization studies, the boiler operation mode was implemented, which corresponded to the condensation operation mode of the

water-heating heat-recovery exchanger. The heat exchange surfaces of the heat-recovery exchanger and gas-heater were made up of finned tubes with a steel base and aluminum fins. The boiler return water and direct water temperatures corresponded to the heat-network schedule with a heat-transfer agent temperature difference of 25°C and a design air temperature of -20°C. The exhaust gases temperature after the boiler in nominal mode corresponded to 166 °C. A multi-level optimization methodology is proposed that allows reducing the general optimization problems of a heat recovery system to simpler, coordinated local optimization problems of each optimization level. The purpose of the work is to increase the exergy efficiency of a heat recovery system through multi-level optimization of operating, technological and structural parameters. To achieve this purpose, the following tasks were set: to develop a block diagram of multi-level optimization and a recursive level bypass scheme; to develop mathematical models for optimizing the parameters of each level; using a recursive optimization level bypass scheme to determine the optimal values of the plant parameter. The basic principles of multi-level optimization of power plants are presented, according to which the heat recovery system is divided into five optimization levels. Statistical methods of experiment planning, exergy balance methods, matrix methods of exergy analysis, and variant and structural-variant methods of exergy analysis were used to build mathematical models. For each optimization level, methods for constructing mathematical models are selected, criteria for assessing exergy efficiency and varying parameters are proposed. The variable parameters of the given level object are used as variable parameters, and the optimal parameters, which are the results of solving local optimization problems of other levels, are used as constant parameters. The efficiency assessment criteria chosen were the Kirpichov energy criterion, heat and energy, energy and technology criteria, and specific material intensity. The functional dependencies and graphs of the efficiency criteria dependencies on the parameters of the heat recovery system elements are presented. The functional dependencies take into account change in exhaust gas humidity in the “wet” zone of the condensing heat recovery exchanger. At each optimization level, the corresponding optimization problems were solved and the operating and structural parameters optimal values of the condensing water-heating heat recovery exchanger and gas-heater were determined. Using a recursive bypass scheme of optimization levels, the optimal values parameters of the heat recovery system were determined, which allows increasing the coefficient the use heat of fuel of the plant by 5...8%.

Ref. 10, tables 2, figures 4.

Keywords: heat recovery system, multi-level optimization, exergy methods.

1. *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, doi: 10.3390/e22010032.

2. *Sayadi S., Tsatsaronis G., Morosuk T.* Splitting the dynamic exergy destruction within a building energy system in-to endogenous and exogenous parts using measured data from the building automation system, *Int. J. Energy Res.* 2020, vol. 44, no. 6, Feb., pp. 4395–4410, doi: 10.1002/er.5213.

3. *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. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.147526.

4. *Stepanova A.* Analiz rabotosposobnosti ustanovki s kombinirovannoy teploutilizatsionnoy sistemoy dlia podogreva vody i dutevogo vozdukha kotloagregata [Analysis of the application combined heat recovery systems for water heating and blast air of the boiler unit]. *Industrial Heat Engineering*, 2016. 38(4). 38–46. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2016.06>. (in rus.)

5. *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 10.15587/1729. 4061.2021/234026 ISSN 1729-3774 4061.2021/234026.

6. *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.

7. *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). C.61–63. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-15>

8. *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. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-12>

9. *Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., & Shevchuk, S. (2024).* Doslidzhennia eksergetychnykh vtrat v plastynchastykh ta hladkotrubnykh povitrihriynykh teploutylizatorakh kotelnykh ustanovok [Study of exergy losses in plate and smooth-tube air-heating exchangers of boiler plants]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 46(3), 82–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.3.2024.9> (in ukr.)

10. *Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., Meranova N., Shevchuk, S.* Vplyv tekhnologichnykh parametriv na eksergetychnu efektyvnist povitronahrivacha teploutylizatsiynoi systemy kotelnoi ustanovky [Influence of technological parameters on the air heater exergy efficiency of the heat recovery system boiler plant]. *Energy and automation.* 2024. №1. P. 5–14. [http://dx.doi.org/10.31548/energiya3\(73\).2024.005](http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(73).2024.005) (in ukr.)

Отримано 09.04.2025

Received 09.04.2025

Прийнято до друку 10.05.2025
Accepted for publication 10.05.2025