

УДК 621.036.7

## **ЕФЕКТИВНІСТЬ КОМБІНОВАНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК (ЧАСТИНА 2)**

**Н. М. Фіалко, чл.-кор. НАНУ, доктор технічних наук, професор**

**А. І. Степанова, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник**

**Р. О. Навродська, кандидат технічних наук, провідний науковий  
співробітник**

**Інститут технічної теплофізики НАН України**

E-mail: nmfialko@ukr.net

**Анотація.** Для комбінованої теплоутилізаційної системи котельної установки, призначеної для підігріву води та підігріву і зволоження дуттєвого повітря, наведено результати аналізу ефективності і оптимізації, проведеного на основі розроблених методик, першу з яких засновано на поєднанні елементів ексергетичного аналізу із структурно-варіантними методами, а другу - на поєднанні елементів ексергетичного аналізу з методами багаторівневої оптимізації. Для поверхневого конденсаційного водопідігрівача та контактного підігрівача і зволожувача повітря, що входять до складу теплоутилізаційної системи, наведено результати проведеної в рамках розробленої методики, яка включає структурно-варіантні методи, оптимізації режимних і конструкційних параметрів. На основі розробленої методики, яка включає методи багаторівневої оптимізації, отримано оптимальні значення режимних та конструкційних параметрів для зазначеної теплоутилізаційної системи. При застосуванні вказаних методик розраховано відповідні значення критеріїв ефективності теплоутилізаційної системи. Порівняльний аналіз вказаних методик показав, що критерій ефективності теплоутилізаційної системи, отриманий при застосуванні методики, яка включає методи багаторівневої оптимізації, приблизно на 2% нижче, ніж критерій ефективності, отриманий при використанні методики, яка включає структурно-варіантні методи. Одержані результати свідчать про те, що при застосуванні методики, яка включає методи багаторівневої оптимізації, режимні та конструкційні параметри теплоутилізаційної системи максимально наближені до оптимальних і відповідно ефективність теплоутилізаційної системи вище.

**Ключові слова:** теплоутилізаційна система, методи оптимізації, критерій ефективності

**Актуальність.** Висока ефективність енергетичних установок є запорукою енергетичної стабільності України. Необхідною умовою підвищення

ефективності енергетичних установок, в тому числі теплоутилізаційних систем, є їх оптимізація. Обґрунтований вибір методів вирішення оптимізаційних задач збільшує результативність оптимізації, що, в свою чергу, підвищує ефективність теплоутилізаційної системи, так як дозволяє при розробці її конструкції використовувати параметри, максимально наближені до оптимальних. Тому створення сучасних методик аналізу ефективності і оптимізації теплоутилізаційних систем є актуальною науковою проблемою.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Сучасний стан проблеми підвищення ефективності теплоутилізаційних систем характеризується використанням комплексних підходів до аналізу ефективності і оптимізації, які поєднують елементи ексергетичного аналізу зі спеціальними методами, серед яких виділимо структурно-варіантні методи, і методи багаторівневої оптимізації [1-4].

Структурно-варіантні методи передбачають моделювання теплоутилізаційної системи за допомогою спеціально побудованої структурної схеми, в якій встановлюються ексергетичні потоки між окремими елементами установки. В рамках ексергетичного аналізу можливість такого моделювання обумовлена основними характеристиками, які відображають сутність ексергетичних понять: адитивністю і універсальністю.

Методи багаторівневої оптимізації дозволяють звести загальну багатокритеріальну і багатопараметричну оптимізаційну задачу до простіших локальних взаємоузгоджених оптимізаційних задач кожного рівня, на які поділяється теплоутилізаційна система [5-7].

**Мета дослідження** – підвищення ефективності комбінованої теплоутилізаційної системи котельної установки, призначеної для підігріву води і підігріву та зволоження дуттьового повітря, на основі її оптимізації та аналізу ефективності.

**Матеріали і методи дослідження.** У частині 2 роботи проведено аналіз

ефективності комбінованої теплоутилізаційної системи, яка призначена для підігріву води і підігріву та зволоження дуттьового повітря. З цією метою розроблена методика, що поєднує елементи ексергетичного аналізу зі структурно-варіантними методами і методами багаторівневої оптимізації.

При використанні зазначеної методики, цільовими функціями оптимізації слугували тепло-ексергетичний і ексерго-технологічний критерії ефективності:

$$\varepsilon = E_{\text{BT}}^{\text{BH}} / Q, k_{\text{ex}}^{\text{T}} = E_{\text{BT}}^{\text{BH}} \cdot m / Q^2$$

де  $E_{\text{BT}}^{\text{BH}}$  – потужність внутрішніх ексергетичних втрат,  $Q$  – тепла потужність,  $m$  – маса.

Мінімальні значення критеріїв ефективності відповідають максимальній ефективності системи. Розрахунок вказаних критеріїв ефективності проводився згідно з формулами, які враховують зміну вологовмісту димових газів і повітря основних елементів теплоутилізаційної системи: поверхневого конденсаційного водонагрівача газів та контактного підігрівача і зволожувача повітря. Залежності для тепло-ексергетичного критерія ефективності мають наступний вигляд.

Для поверхневого конденсаційного водопідігрівача:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 1/Q \left\{ G^{\Gamma} \left[ c_p^{\Gamma} (t_{\text{ВХ}}^{\Gamma} - t_{\text{ВИХ}}^{\Gamma}) - t_{\text{НС}} \left( c_p^{\Gamma} \ln \frac{t_{\text{ВХ}}^{\Gamma}}{t_{\text{ВИХ}}^{\Gamma}} - \frac{R}{\mu^{\Gamma}} \ln \frac{p_{\text{ВХ}}^{\Gamma} - p_{s_{\text{ВХ}}}^{\Gamma} \phi_{\text{ВХ}}^{\Gamma}}{p_{\text{ВИХ}}^{\Gamma} - p_{s_{\text{ВИХ}}}^{\Gamma} \phi_{\text{ВИХ}}^{\Gamma}} \right) \right] - \right. \\ & - G^{\Gamma} X_{\text{ВИХ}}^{\Gamma} \left[ c_p^{\Pi} (t_{\text{ВИХ}}^{\Gamma} - t_{\text{НС}}) - t_{\text{НС}} \left( c_p^{\Pi} \ln \frac{t_{\text{ВИХ}}^{\Gamma}}{t_{\text{НС}}} - \frac{R}{\mu^{\Pi}} \ln \frac{\rho_{\text{ВИХ}}^{\Pi} p_{s_{\text{ВИХ}}}^{\Pi} v_{\text{ВИХ}}^{\Pi} X_{\text{ВИХ}}}{\rho_{\text{НС}}^{\Pi} p_{s_0}^{\Pi} v_{\text{НС}}^{\Pi} \phi_{\text{НС}} (1 + X_{\text{ВИХ}})} \right) \right] + \\ & + G^{\Gamma} X_{\text{ВХ}}^{\Gamma} \left[ c_p^{\Pi} (t_{\text{ВХ}}^{\Gamma} - t_{\text{НС}}) - t_{\text{НС}} \left( c_p^{\Pi} \ln \frac{t_{\text{ВХ}}^{\Gamma}}{t_{\text{НС}}} - \frac{R}{\mu^{\Pi}} \ln \frac{\rho_{\text{ВХ}}^{\Pi} p_{s_{\text{ВХ}}}^{\Pi} v_{\text{ВХ}}^{\Pi} X_{\text{ВХ}}}{\rho_{\text{НС}}^{\Pi} p_{s_0}^{\Pi} v_{\text{НС}}^{\Pi} \phi_{\text{НС}} (1 + X_{\text{ВХ}})} \right) \right] - \\ & \left. - G^{\text{B}} \left[ (i_{\text{ВИХ}}^{\text{B}} - i_{\text{ВХ}}^{\text{B}}) - t_{\text{НС}} (s_{\text{ВИХ}}^{\text{B}} - s_{\text{ВХ}}^{\text{B}}) \right] \right\}; \end{aligned}$$

Для контактного підігрівача і зволожувача повітря:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 1/Q \left\{ G^B \left[ \left( i_{\text{ВХ}}^B - i_{\text{ВИХ}}^B \right) - t_{\text{НС}} \left( s_{\text{ВХ}}^B - s_{\text{ВИХ}}^B \right) \right] - \right. \\ & - G^{\text{ПВ}} \left[ c_p^{\text{ПВ}} \left( t_{\text{ВИХ}}^{\text{ПВ}} - t_{\text{ВХ}}^{\text{ПВ}} \right) - t_{\text{НС}} \left( c_p^{\text{ПВ}} \ln \frac{t_{\text{ВИХ}}^{\text{ПВ}}}{t_{\text{ВХ}}^{\text{ПВ}}} - \frac{R}{\mu^{\text{ПВ}}} \ln \frac{p_{\text{ВИХ}}^{\text{ПВ}} - p_{s_{\text{ВИХ}}}^{\text{ПВ}} \varphi_{\text{ВИХ}}^{\text{ПВ}}}{p_{\text{ВХ}}^{\text{ПВ}} - p_{s_{\text{ВХ}}}^{\text{ПВ}} \varphi_{\text{ВХ}}^{\text{ПВ}}} \right) \right] - \\ & - G^{\text{ПВ}} X_{\text{ВХ}}^{\text{ПВ}} \left[ c_p^{\text{П}} \left( t_{\text{ВХ}}^{\text{ПВ}} - t_{\text{НС}} \right) - t_{\text{НС}} \left( c_p^{\text{П}} \ln \frac{t_{\text{ВХ}}^{\text{ПВ}}}{t_{\text{НС}}} - \frac{R}{\mu^{\text{П}}} \ln \frac{\rho_{\text{ВХ}}^{\text{П}} p_{s_{\text{ВХ}}}^{\text{П}} v_{\text{ВХ}}'' X_{\text{ВХ}}}{\rho_{\text{НС}}^{\text{П}} p_{s_0}^{\text{П}} v_{\text{НС}}'' \varphi_{\text{НС}} (1 + X_{\text{ВХ}})} \right) \right] + \\ & \left. + G^{\text{ПВ}} X_{\text{ВИХ}}^{\text{ПВ}} \left[ c_p^{\text{П}} \left( t_{\text{ВИХ}}^{\text{ПВ}} - t_{\text{НС}} \right) - t_{\text{НС}} \left( c_p^{\text{П}} \ln \frac{t_{\text{ВИХ}}^{\text{ПВ}}}{t_{\text{НС}}} - \frac{R}{\mu^{\text{П}}} \ln \frac{\rho_{\text{ВИХ}}^{\text{П}} p_{s_{\text{ВИХ}}}^{\text{П}} v_{\text{ВИХ}}'' X_{\text{ВИХ}}}{\rho_{\text{НС}}^{\text{П}} p_{s_0}^{\text{П}} v_{\text{НС}}'' \varphi_{\text{НС}} (1 + X_{\text{ВИХ}})} \right) \right] \right\}, \end{aligned}$$

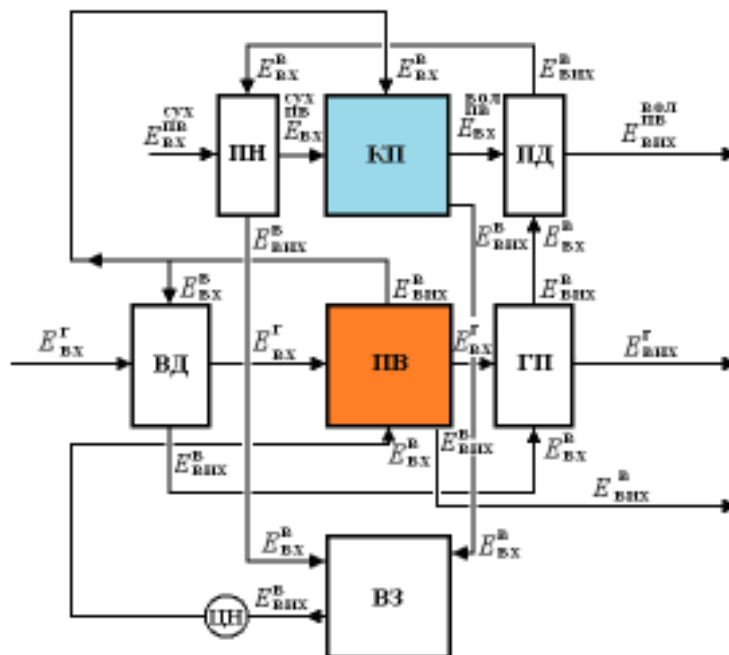
Де  $c_p$  – питома ізобарна теплоємність;  $G$  – масова витрата теплоносія;  $h$  – ентальпія;  $N$  – потужність;  $p$  – тиск;  $p_s$  – тиск насиченої водяної пари;  $R$  – газова стала;  $s$  – ентропія;  $T$  – температура;  $T_0$  – температура навколишнього середовища;  $X$  – вологість димових газів;  $\varphi, \varphi_0$  – відносна вологість димових газів і навколишнього середовища;  $\mu$  – молекулярна маса. Індекси верхні: г – димові гази; в – вода; п – повна; пв – повітря. Індекси нижні: вх, вих – вхідний, вихідний параметр; нс – навколишнє середовище.

Для методики, яка включає структурно-варіантний метод оптимізації, передбачено розроблення структурної схеми установки, що складається з ряду дискретних взаємопов'язаних енергетичними потоками елементів більш простої структури.

Для методики, яка включає метод багаторівневої оптимізації передбачено розроблення блок-схеми і схеми рекурсивного обходу рівнів оптимізації, на які поділяється теплоутилізаційна система.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Для реалізації першої методики теплоутилізаційну систему, яка призначена для підігріву води та підігріву і зволоження дуттьового повітря, було подано у вигляді структурної

схеми, в якій ідентифіковано всі ексергетичні потоки між окремими елементами (рис. 1).



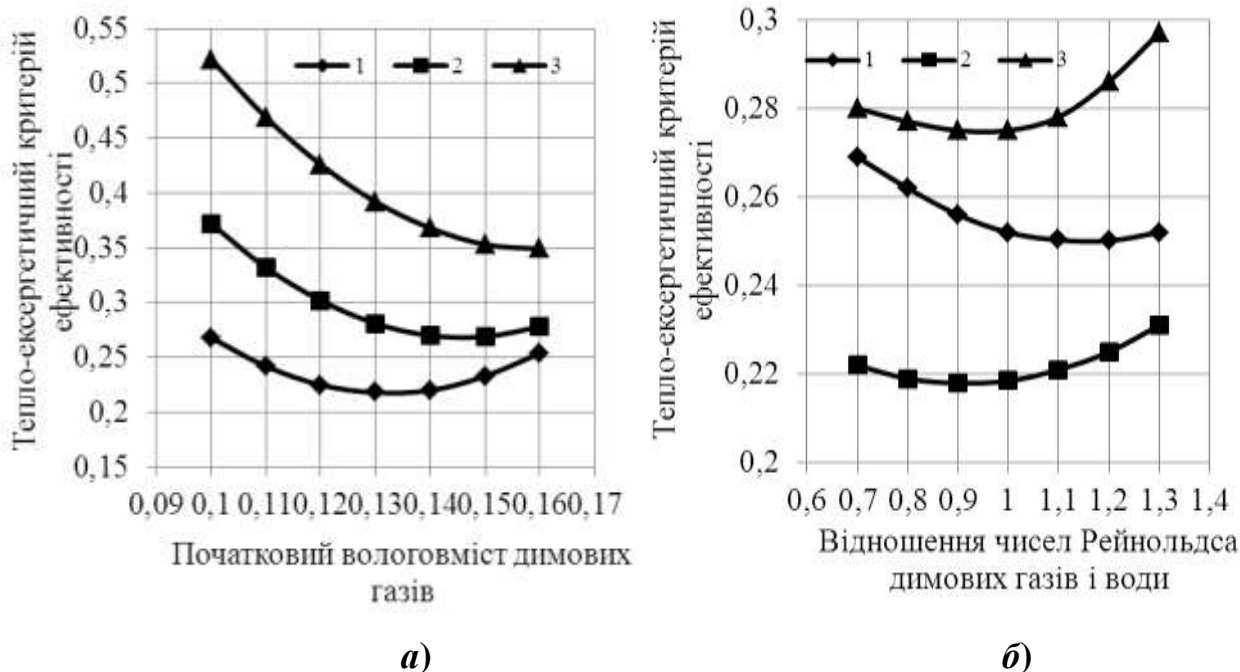
**Рис. 1. Структурна схема теплоутилізаційної системи для підігріву води і підігріву та зволоження дуттьового повітря із зазначенням ексергетичних потоків між елементами:**

- ПН – повітрянагрівач; КП – контактний підігрівач і зволожувач повітря;
- ПД – повітродогрівач; ВД – вододогрівач; ПВ – поверхневий водопідігрівач;
- ГП – газопідігрівач; ВЗ – водозбірник; ЦН – циркуляційний насос

Згідно з наведеною на рис. 1 схемою виконано теплові та ексергетичні розрахунки, які дозволили виділити два основні елементи – поверхневий конденсаційний водопідігрівач ПВ та контактний підігрівач і зволожувач повітря КП, зміна ексергетичних втрат в яких найбільш суттєво впливає на зміну ефективності системи в цілому. Проведено оптимізацію деяких режимних і конструкційних параметрів для зазначених елементів.

Для поверхневого конденсаційного водонагрівача параметрами, які підлягали оптимізації, були вибрані початковий  $X_{вх}^r$  і кінцевий  $X_{вих}^r$

вологівмісти димових газів, а також відношення чисел Рейнольдса теплоносіїв. Отримано залежності критеріїв ефективності від зазначених параметрів і проведено оптимізацію зазначених параметрів (рис. 2).



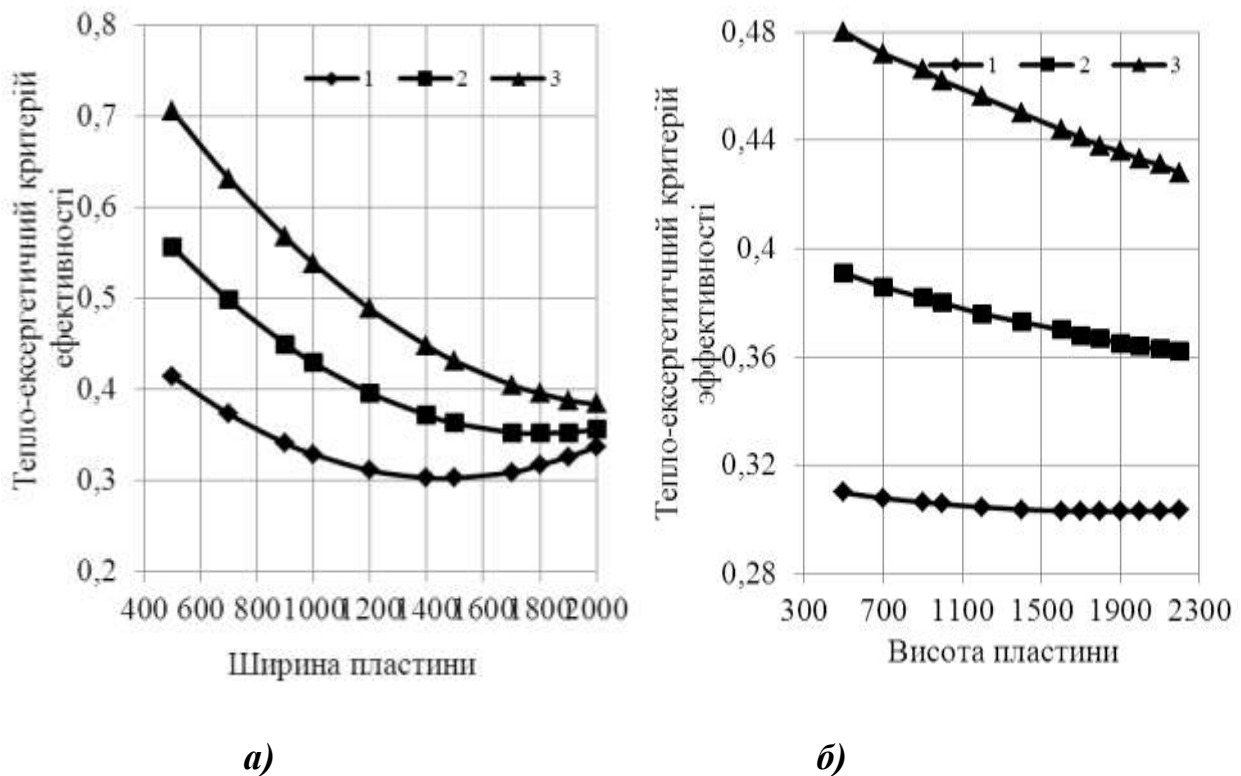
**Рис. 2. Для поверхневого конденсаційного водонагрівача залежність  $\varepsilon$  від початкового вологовмісту димових газів**

*a)* при  $X_{\text{вих}}^{\Gamma} = 0,04$  кг/кг с.г.,  $Re^{\Gamma} / Re^{\text{B}} = 0,94$ : 1 –  $X_{\text{вих}}^{\Gamma} = 0,04$  кг/кг с.г.; 2 – 0,06; 3 – 0,08 та від відношення чисел Рейнольдса димових газів і води *б)* при  $X_{\text{вих}}^{\Gamma} = 0,04$  кг/кг с.г.: 1 –  $X_{\text{вх}}^{\Gamma} = 0,16$  кг/кг с.г.; 2 – 0,13; 3 – 0,10.

Як видно з рисунка 2*a*, значення тепло-ексергетичного критерію ефективності  $\varepsilon$  для  $X_{\text{вих}}^{\Gamma} = 0,04$  кг/кг с.г. та для  $X_{\text{вих}}^{\Gamma} = 0,06$  кг/кг с.г. мають мінімум при  $X_{\text{вх}}^{\Gamma} = 0,13$  кг/кг с.г. і при  $X_{\text{вх}}^{\Gamma} = 0,14$  кг/кг, а для  $X_{\text{вих}}^{\Gamma} = 0,08$  кг/кг с.г. найменше значення тепло-ексергетичного критерію ефективності спостерігається на кінці заданого інтервалу зміни  $X_{\text{вх}}^{\Gamma}$ .

Як видно з рис. 2*б*, мінімум відношення чисел Рейнольдса димових газів і води залежить від величини вхідного вологовмісту димових газів.

Для контактного повітрянагрівача і зволожувача повітря досліджено вплив на ефективність геометричних параметрів теплообмінної поверхні: ширини  $a_{пл}$ , висоти пластини  $b_{пл}$ , а також відстані між пластинами  $s_{пл}$ , і проведена оптимізація зазначених параметрів. Крім того, для зазначеного повітрянагрівача, знайдено оптимальні параметри при значеннях температури навколишнього середовища  $t_{nc} = -5^{\circ}\text{C}$ ;  $0^{\circ}\text{C}$ ;  $5^{\circ}\text{C}$ . Деякі результати розрахунків наведено на рис. 3,4.



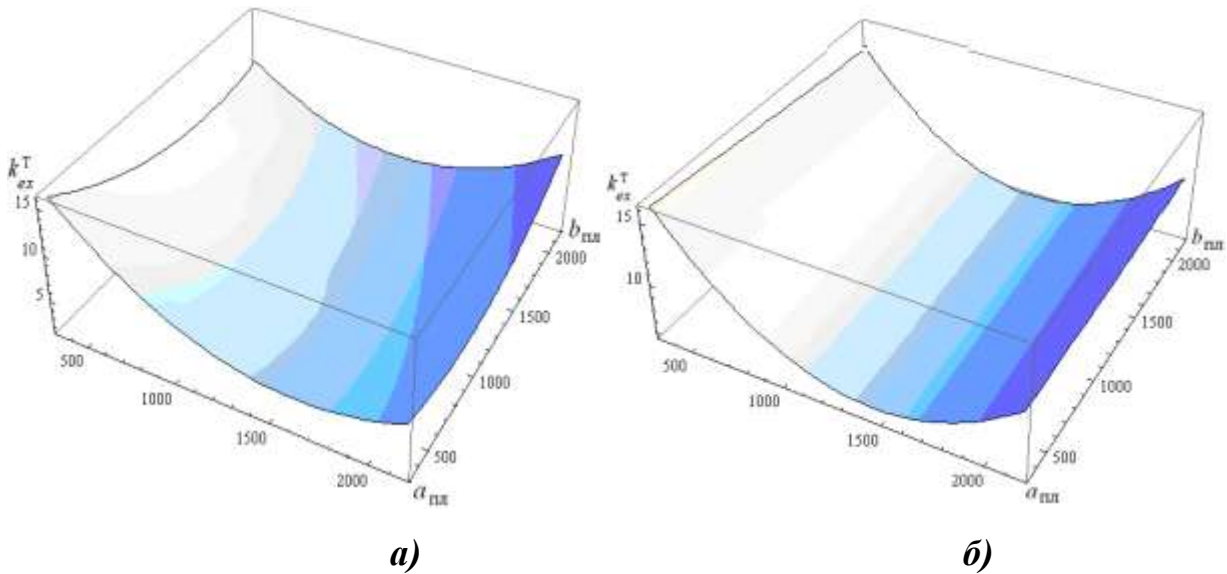
**Рис. 3. Для контактного повітрянагрівача і зволожувача повітря залежність  $\epsilon$  від ширини пластини**

*а)* при  $b_{пл} = 1853\text{мм}$ ;  $t_{nc} = 0^{\circ}\text{C}$ : 1 –  $s_{пл} = 5\text{мм}$ ; 2 – 10; 3 – 15 та від висоти пластини,

*б)* при  $a_{пл} = 1463\text{мм}$ ;  $t_{nc} = 0^{\circ}\text{C}$ : 1 –  $s_{пл} = 5\text{мм}$ ; 2 – 10; 3 – 15

При використанні в якості цільової функції оптимізації як ексерго-технологічного критерія ефективності, так і тепло-ексергетичного критерія, мінімум їхніх значень при зміні ширини пластини досить виражений, тоді як мінімум значень критеріїв ефективності при зміні висоти пластини в межах

заданого інтервалу слабо виражений і найменше їхнє значення відповідає приблизно кінцю відповідного інтервалу.



**Рис.4.** Для контактеного повітрянагрівача і зволожувача повітря залежність

$k_{ex}^T$  від ширини і висоти пластини:  $s_{пл} = 5\text{мм}$ , а)  $t_{нс} = -5^\circ\text{C}$ ;

б)  $t_{нс} = 5^\circ\text{C}$

Контактний підігрівач і зволожувач повітря з оптимальними параметрами введено складовими елементами в теплоутилізаційну установку, для якої розраховано значення тепло-ексергетичного і ексерго-технологічного критеріїв ефективності.

Як видно з наведених в таблицях 1,2 даних, ефективність повітрогрійного теплоутилізатора для розглянутих значень початкової температури повітря нижче ефективності водогрійного теплоутилізатора. В зимовий період повітрогрійний теплоутилізатор працює ефективніше в середньому на 15% ... 20%.

### 1. Оптимальні параметри контактеного повітрянагрівача

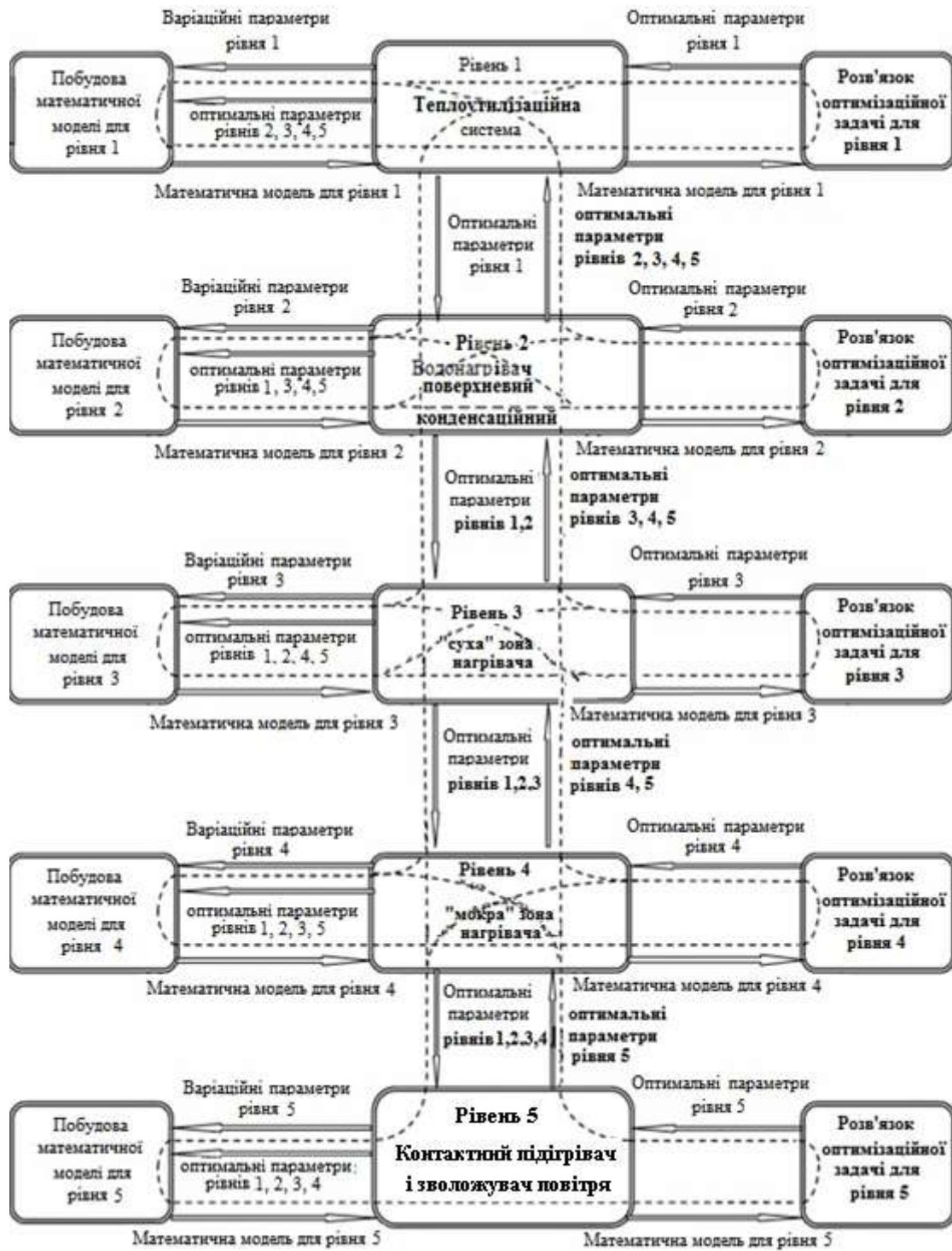
Цільова функція	$t_{нс} = -5^\circ\text{C}$			$t_{нс} = 0^\circ\text{C}$			$t_{нс} = 5^\circ\text{C}$		
	$a_{пл}$	$b_{пл}$	$s_{пл}$	$a_{пл}$	$b_{пл}$	$s_{пл}$	$a_{пл}$	$b_{пл}$	$s_{пл}$
$\varepsilon$	1766	1294	5	1463	1853	5	1413	2000	5
$k_{ex}^T$	1434	1235	5	1379	2000	5	1315	2000	5



## 2. Критерії ефективності теплоутилізаторів

Цільова функція	Водонагрівач	Повіронагрівач		
		$t_{nc} = -5^{\circ}C$	$t_{nc} = 0^{\circ}C$	$t_{nc} = 5^{\circ}C$
$\varepsilon$	0,218	0,273	0,303	0,330
$k_{ex}^T$	0,254	1,57	4,60	5,72

Для реалізації методики, яка включає метод багаторівневої оптимізації, оптимальні параметри поверхневого конденсаційного водопідігрівача та контактного підігрівача використовуються в якості початкових постійних параметрів. В рамках зазначеної методики розроблено блок-схему і схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації, на які поділено теплоутилізаційну систему. Це дозволяє при розв'язуванні складної багатокритеріальної і багатопараметричної оптимізаційної задачі узгодити розв'язки локальних оптимізаційних задач кожного рівня (рис.5). Для даної задачі схема рекурсивного обходу рівнів оптимізації (пунктирна лінія) передбачає розгалуження на верхньому рівні, що забезпечує в певних умовах припинення рекурсії, і розгалуження на другому, третьому і четвертому рівнях для введення в дію паралельних рекурсій, коли на одній рекурсивній гілці робиться кілька рекурсивних викликів. Побудова математичних моделей на кожному рівні оптимізації здійснювалася за допомогою статистичних методів планування експерименту. Для побудови математичної моделі кожного рівня використовуються оптимальні параметри, які є результатами розв'язування оптимізаційних задач інших рівнів, та варійовані параметри об'єкта даного рівня. На основі методики, яка включає метод багаторівневої оптимізації, отримано оптимальні значення режимних та конструкційних параметрів для комбінованої теплоутилізаційної системи і розраховані відповідні значення критеріїв ефективності.



**Рис. 5. Блок-схема багаторівневої оптимізації (пунктирною лінією позначено схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації).**

Врахування технологічних особливостей та особливостей експлуатації теплоутилізаційного обладнання в конкретних умовах призводить до

необхідності знаходження оптимальної області зміни параметрів, яка визначається на основі конкретних значень оптимальних параметрів. Ширина цієї області залежить від зазначених особливостей теплоутилізаційної системи і від ступеня зміни критеріїв ефективності в межах області (таблиця 3)

**3. Результати розв'язання оптимізаційної задачі методом багаторівневої оптимізації для комбінованої теплоутилізаційної системи, призначеної для нагрівання води та нагрівання і зволоження дуттьового повітря**

Рівень	Варійовані параметри	Позначення	Розмірність	Оптимальні значення
Утилізаційна система	Витрата води	$G^B$	кг/с	0,8 ... 1,1
	Початковий вологовміст газів	$X_{ВХ}^Г$	кг/кг с. г.	0,18 ... 0,20
	Температура води на вході	$t_{ВХ}^B$	°С	30 ... 32
Водопідігрівач конденсаційний	Відношення початкового і кінцевого вологовмісту газів.	$\frac{X_{ВХ}^Г}{X_{ВНХ}^Г}$		3,0 ... 3,3
	Відношення чисел Рейнольдса димових газів та води.	$\frac{Re^Г}{Re^B}$		1,0 ... 1,3
"Суха" зона водопідігрівача	Висота ребра	$h_p$	мм	10,0 ... 11,0
	Товщина ребра	$b_p$	мм	0,4 ... 0,6
	Міжреберний крок	$s_p$	мм	3,0 ... 3,5
"Мокра" зона водопідігрівача	Висота ребра	$h_p$	мм	11,0 ... 13,0
	Товщина ребра	$b_p$	мм	0,4 ... 0,6
	Міжреберний крок	$s_p$	мм	4,0 ... 5,0
Контактний підігрівач і зволожувач повітря	Відношення початкового і кінцевого вологовмісту повітря	$\frac{X_{ВХ}^{ПВ}}{X_{ВНХ}^{ПВ}}$		0,05 ... 0,06
	Щільність зрошення насадки	$Z$	м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> год	10,0 ... 15,0
	Питома площа поверхні насадки	$f$	м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	90,0 ... 100,0

Порівняльний аналіз методик оптимізації показав, що критерій ефективності системи при використанні методики, яка включає метод багаторівневої оптимізації, складає  $\varepsilon = 0,554$ , що приблизно на 2% нижче, чим при використанні методики, яка включає структурно-варіантний метод, для

якого  $\varepsilon = 0,572$ . Таким чином, при застосуванні методів багаторівневої оптимізації отримані режимні та конструкційні параметри теплоутилізаційної системи максимально наближені до оптимальних і відповідно ефективність теплоутилізаційної системи вище.

### **Висновки і перспективи.**

1. В рамках розробленої методики, яка включає елементи ексергетичного аналізу в поєднанні із структурно-варіантними методами, проведено оптимізацію режимних і конструкційних параметрів поверхневого конденсаційного водопідігрівача та контактного підігрівача і зволожувача повітря, що входять до складу комбінованої теплоутилізаційної системи.

2. На основі розробленої методики, яка включає методи багаторівневої оптимізації, отримано оптимальні значення режимних та конструкційних параметрів для зазначеної теплоутилізаційної системи.

3. При застосуванні вказаних методик розраховано відповідні значення критеріїв ефективності теплоутилізаційної системи.

4. Порівняльний аналіз вказаних методик показав, що критерій ефективності теплоутилізаційної системи, отриманий при застосуванні методики, яка включає методи багаторівневої оптимізації, складає  $\varepsilon = 0,554$ , що приблизно на 2% нижче, ніж критерій ефективності  $\varepsilon = 0,572$ , отриманий при використанні методики, яка включає структурно-варіантні методи.

5. Таким чином, при застосуванні методики, яка включає методи багаторівневої оптимізації, режимні та конструкційні параметри теплоутилізаційної системи максимально наближені до оптимальних і відповідно ефективність теплоутилізаційної системи вище.

### **Список літератури**

1. Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения / В.М. Бродянский. – М.: Издательство «Мир». – 1967. – 247с.
2. Бойко А.В. Методика и алгоритм оптимизации проточных частей осевых

турбин с учетом режимов эксплуатации / А.В. Бойко, Ю.Р. Говорущенко, А.П. Усатый, А.С. Руденко // Тяжелое машиностроение. – 2009, №9. – С. 11–15.

3. Долинский А.А. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой энергетики / Долинский А.А., Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Гнедаш Г.А. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, №4. – С. 27 – 34.

4. Налимов В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М. : Наука, 1971. – 207 с.

5. Фиалко Н.М. Эксерго-технологическая эффективность газоздушных теплоутилизаторов энергетических установок / Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, Ю.В. Шеренковский, А.И. Степанова, Р.А. Навродская, М.А. Новаковский // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33, №3. – С.42–49.

6. Фиалко Н.М. Оптимизация теплоутилизационной установки стекловаренной печи / Степанова А.И., Навродская Р.А., Шеренковский Ю. В. // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 5. – С. 81-88.

7. Фиалко Н.М. Анализ эффективности теплоутилизационной установки для нагревания и увлажнения дутьевого воздуха котлоагрегата / Степанова А.И., Пресич Г.А., Гнедаш Г.А.. // Промышленная теплотехника. – 2015. – Т. 37, № 4. – С. 71-79.

#### **References**

8. Brodyansky V. (1967). Eksergeticheskiy metod i yego prilozheniya [The exergy method and its applications]. Moscow: Mir, 247..

9. Boyko, A.V., Govorushchenko, Yu.R. et al. (2009). Metodika i algoritm optimizatsii protochnykh chastey osevykh turbin s uchetom rezhimov ekspluatatsii [Technique and algorithm for optimization of flow parts of axial turbines, taking into account operating conditions]. Tyazheloye mashinostroyeniye. (9). 11–15.

10. Dolinsky, A.A., Fialko, N.M, Navrodsкая, R.A, Gnedash, G.A. (2014). Osnovnyye printsipy sozdaniya teploutilizatsionnykh tekhnologiy dlya kotel'nykh maloy energetiki [The basic principles of creating heat recovery technologies for small-scale boiler houses] Promyshlennaya teplotekhnika, 36(4), 27-34.

11. Nalimov, V.V. (1971) Teoriya eksperimenta [Theory of experiment]. Moscow: Nauka, 207.

12. Fialko, N.M., Prokopov, V.G., Stepanova, R.A. et al. (2011). Eksergo-tekhnologicheskaya effektivnost' gazovozdushnykh teploutilizatorov energeticheskikh ustanovok [Exergo-technological efficiency of gas-air heat-recovery devices of power plants] Promyshlennaya teplotekhnika, 33(3), 42-49.

13. Fialko, N.M., Stepanova, A.I., Navrodsкая, R.A et al. (2014). Optimizatsiya teploutilizatsionnoy ustanovki steklovarennoy pechi [Optimization of the heat recovery unit of the glass melting furnace] Promyshlennaya teplotekhnika. 36(5), 81-88.

14. Fialko, N.M., Stepanova, A.I., Navrodsкая, R.A et al. (2015). Analiz effektivnosti teplo-utilizatsionnoy ustanovki dlya nagrevaniya i uvlazhneniya du-

t'yevogo vozdukha kotloagregata [Analysis of the efficiency of the heat recovery unit for heating and humidifying the blast air of the boiler unit] Promyshlennaya teplotekhnika, 37(4), 71-79.].

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ (ЧАСТЬ 2)**

*Н. М. Фиалко, А. И. Степанова, Р. А. Навродская*

**Аннотация.** Для комбинированной теплоутилизационной системы котельной установки, предназначенной для подогрева воды и подогрева и увлажнения дутьевого воздуха, приведены результаты анализа эффективности и оптимизации, проведенного на основе разработанных методик, первая из которых основана на сочетании элементов эксергетического анализа со структурно-вариантными методами, а вторая - на сочетании элементов эксергетического анализа с методами многоуровневой оптимизации. Для поверхностного конденсационного водоподогревателя и контактного подогревателя и увлажнителя воздуха, входящих в состав теплоутилизационных системы, приведены результаты проведенной в рамках разработанной методики, которая включает структурно-вариантные методы, оптимизации режимных и конструктивных параметров. На основе разработанной методики, которая включает методы многоуровневой оптимизации, получены оптимальные значения режимных и конструктивных параметров для указанной теплоутилизационной системы. При применении указанных методик рассчитаны соответствующие значения критериев эффективности теплоутилизационной системы. Сравнительный анализ указанных методик показал, что критерий эффективности теплоутилизационной системы, полученный при применении методики, включающей методы многоуровневой оптимизации, примерно на 2% ниже, чем критерий эффективности, полученный при использовании методики, которая включает структурно-вариантные методы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при применении методики, которая включает методы многоуровневой оптимизации, режимные и конструкционные параметры теплоутилизационной системы максимально приближены к оптимальным и соответственно эффективность теплоутилизационной системы выше. **Ключевые слова:** *теплоутилизационная система, методы оптимизации, критерии эффективности*

## **EFFICIENCY OF COMBINED HEAT-UTILIZATION SYSTEMS OF BOILER INSTALLATIONS (PART 2)**

*N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodsкая*

**Abstract.** The combined heat recovery system of the boiler installation, which is intended for heating the water and heating and humidifying the blowing air, is

considered in the work. The results of the analysis of efficiency and optimization of the heat utilization system are presented. The analysis is based on the developed techniques. The first method is based on a combination of elements of exergy analysis with structural-variant methods, the second - on the combination of elements of the exergy analysis with methods of multi-level optimization. In the framework of the first method, a structural scheme of a heat recovery system was developed, in which all exergent flows between elements of a simple structure were identified. The thermal and exergy calculations were made, which allowed to distinguish two main elements - a surface condensing water heater and a contact heat heater and humidifier. In these elements, the change in exergy losses most significantly affects the change in the efficiency of the entire system. The optimization of some operational and structural parameters for these elements was carried out. These elements with optimal parameters are introduced into the heat recovery system. For the heat utilization system, the value of the efficiency criteria is calculated. Within the framework of the multilevel optimization method, the heat utilization system is divided into optimization levels. The block diagram and the scheme of recursive traversal of optimization levels are developed. This allows for the solution of a complex multicriterial and multi-parameter optimization problem to reconcile the solutions of local optimization problems of each level. On the basis of the developed methodology, which includes methods of multilevel optimization, the optimal values of regime and structural parameters for the specified heat recovery system are obtained. When applying these techniques, the corresponding values of the efficiency criteria of the heat recovery system are calculated. A comparative analysis of these techniques showed that the efficiency of the heat recovery system obtained by using the second method is approximately 2% lower than the efficiency criterion obtained with the use of the first method. The obtained results testify that, when applying the methodology, which includes methods of multilevel optimization, the regime and structural parameters of the heat utilization system are as close as possible to the optimal ones. Thus, the efficiency of the heat utilization system is higher when using a methodology that includes multi-level optimization methods.

**Key words:** *heat utilization system, optimization methods, efficiency criteria*