

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З РЕКУПЕРАТОРОМ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

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

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

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

С. І. Шевчук, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

*Г. О. Сбродова, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник*

Інститут технічної теплофізики НАН України,

E-mail: nmfialko@ukr.net

Анотація. Сучасний розвиток енергетики характеризується значним збільшенням вартості енергоносіїв, природних ресурсів, а також зростаючими вимогами щодо охорони навколишнього середовища від впливу відходів виробництва комунальних та промислових підприємств. Наразі проблема енергозбереження в комунальній теплоенергетиці певною мірою вирішується шляхом утилізації теплоти продуктів згоряння палива. Підвищення ефективності відповідного теплоутилізаційного устаткування є важливим та актуальним.

Мета дослідження – оптимізація параметрів теплоутилізаційної системи з рекуператором промислової печі регенеративного типу на основі комплексної багаторівневої оптимізації, статистичної теорії планування експерименту та функціонального аналізу.

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання: розробити схему багаторівневої оптимізації та схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації для теплоутилізаційної системи з рекуператором скловарної печі; на основі статистичних методів планування експерименту та методів функціонального аналізу розробити математичні моделі для кожного рівня оптимізації та отримати функціональні залежності критеріїв оцінки ефективності системи від основних параметрів; визначити оптимальні значення режимних та конструкційних параметрів теплоутилізаційної системи з рекуператором скловарної печі.

Основний принцип методу багаторівневої оптимізації полягає у такому. При побудові математичної моделі кожного рівня оптимізації змінними параметрами слугують параметри, що варіюються для об'єктів даного рівня, а постійними параметрами слугують оптимальні параметри, які є результатами вирішення

локальних оптимізаційних задач інших рівнів. Основна задача при використанні статистичних методів теорії планування експерименту та методів функціонального аналізу – визначення функціональних залежностей критеріїв оцінки ефективності досліджуваної теплоутилізаційної системи від її основних параметрів.

Наведено результати досліджень режимних та конструкційних параметрів теплоутилізаційної системи, яка включає рекуператор скидної теплоти газоспоживальної промислової печі регенеративного типу. Рекуператор призначено для нагрівання повітря на горіння шляхом утилізації теплоти димових газів після регенераторів печі. Рекуператори komponуються з необхідного числа модулів в залежності від витрати димових газів. Теплообмінна поверхня модуля набирається зі сталевих панелей, утворених трубами з мембранами. Рух димових газів здійснюється в міжпанельному просторі, а повітря – в трубному. З метою інтенсифікації теплообміну з боку повітря труби мають турбулізатори потоку.

Для досліджуваної теплоутилізаційної системи розроблено схему багаторівневої оптимізації та схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації. З використанням зазначеної комплексної методики розраховано оптимальні значення режимних та конструкційних параметрів теплоутилізаційної системи. Методика дозволяє визначати параметри, які максимально наближені до оптимальних. Це підвищує ефективність теплоутилізації запічних газів, у середньому, на 2,5 % – 3 % порівняно з ефективністю систем, оптимізованих із використанням інших методик оптимізації.

Ключові слова: *утилізація теплоти; рекуперація теплоти запічних газів; комплексні методики досліджень*

Актуальність. Сучасний розвиток енергетики характеризується значним збільшенням вартості енергоносіїв, природних ресурсів, а також зростаючими вимогами щодо охорони навколишнього середовища від впливу відходів виробництва комунальних та промислових підприємств. Наразі проблема енергозбереження певною мірою вирішується шляхом утилізації теплоти продуктів згоряння палива в теплоутилізаційних установках. Підвищення ефективності теплоутилізаційного устаткування в умовах його експлуатації набуває все більшого значення. Важливим завданням при вирішенні цієї проблеми є оптимізація параметрів теплоутилізаційних систем. Сучасні методики оптимізації параметрів енергетичних установок найчастіше включають методи термoeкономічного аналізу. Комплексні методики дослідження на основі ексерготехнологічного підходу використовуються недостатньою мірою. Їх використання для досліджень теплоутилізаційного устаткування дозволяє визначати параметри, максимально

наближені до оптимальних, що підвищує ефективність теплоутилізації. Обґрунтований вибір методики дослідження сприяє впровадженню в енергетичне господарство України теплоутилізаційних систем із високими показниками енергетичної та ексергетичної ефективності. Тому дослідження в цьому напрямку можна вважати актуальними і перспективними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Методи ексергетичного аналізу лежать в основі численних методик дослідження, які, в основному, базуються на використанні термoeкономічних та топологоексергетичних моделей. Для визначення ефективності енергетичних систем різного призначення використовуються методи термoeкономічного аналізу, теорії ексергетичної вартості, продуктивний структурний аналіз, структурна теорія термoeкономіки та ін. [1–4]. У роботі [1] наведено результати досліджень систем зберігання теплової енергії, проведених на основі термoeкономічних методів розподілу витрат. У роботі [2] використано методи ексергетичного аналізу, засновані на теорії вартості ексергії, для аналізу енергетичних процесів у холодильній машині. У роботах [3, 4] розроблено багаторівневі моделі для термoeкономічного дослідження котлотурбінних систем. Підвищенню ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем енергетичних установок різного призначення на основі використання комплексних методик дослідження присвячено роботи [5–10]. Наразі зазначена проблема потребує більш глибокого вивчення із застосуванням комплексних методик на основі ексерготехнологічного підходу. Такі методики досліджень теплоутилізаційних систем енергетичних установок включають структурно-варіантні методи, статистичні методи планування експерименту, методи функціонального аналізу, теорії теплопередачі та інші сучасні методи дослідження. Комплексні методики дозволяють визначати параметри теплоутилізаційної системи, максимально наближені до оптимальних, що підвищує ефективність теплоутилізації.

Мета дослідження – оптимізація параметрів теплоутилізаційної системи з рекуператором промислової печі регенеративного типу на основі комплексної методики дослідження, яка поєднує методи багаторівневої оптимізації, статистичної

теорії планування експерименту та функціонального аналізу. Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання:

- відповідно до принципів багаторівневої оптимізації розробити схему багаторівневої оптимізації та схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації для теплоутилізаційної системи з рекуператором скловарної печі;
- на основі статистичних методів планування експерименту та методів функціонального аналізу розробити математичні моделі для кожного рівня оптимізації та отримати функціональні залежності критеріїв оцінки ефективності системи від основних параметрів;
- визначити оптимальні значення режимних та конструкційних параметрів теплоутилізаційної системи з рекуператором скловарної печі.

Матеріали та методи дослідження. Досліджено теплоутилізаційну систему з рекуператором скловарної печі регенеративного типу, який призначено для нагрівання повітря на горіння шляхом утилізації скидної теплоти запічних газів. Вказаний рекуператор належить до повітрогрійних теплоутилізаторів, які компонуються з необхідної кількості модулів в залежності від витрати димових газів [8]. Рис. 1 ілюструє принципову схему використання рекуператора за скловарними печами.

Теплообмінна поверхня модуля набирається зі сталевих панелей, утворених трубами з мембранами. Труби мають інтенсифікатори теплообміну на їхніх внутрішніх поверхнях Рух теплоносіїв перехреснотоківий з проходженням димових газів у міжтрубному просторі, а повітря в трубах, де забезпечується інтенсифікація теплообміну в 1,6 – 1,9 разів при помірному (порівняно з іншими методами інтенсифікації теплообміну) зростанні аеродинамічного опору. Конфігурація панелей сприяє зменшенню відкладень пилу в процесі експлуатації теплоутилізатора. Його конструкційне виконання дозволяє виконувати додаткове очищення цих поверхонь стисненим повітрям. Для оптимізації параметрів теплоутилізаційної системи з рекуператором скловарної печі використано комплексну методику, що поєднує методи багаторівневої оптимізації, статистичної теорії планування експерименту та функціонального аналізу. Методика дозволяє

оптимізувати значну кількість режимних, теплотехнічних, технологічних і конструкційних параметрів теплоутилізаційної системи та визначати їхні параметри, максимально наближені до оптимальних. Це підвищує ефективність теплоутилізаційної системи, у середньому, на 2,5 % – 3 % порівняно з ефективністю систем, оптимізованих з використанням інших методик оптимізації.

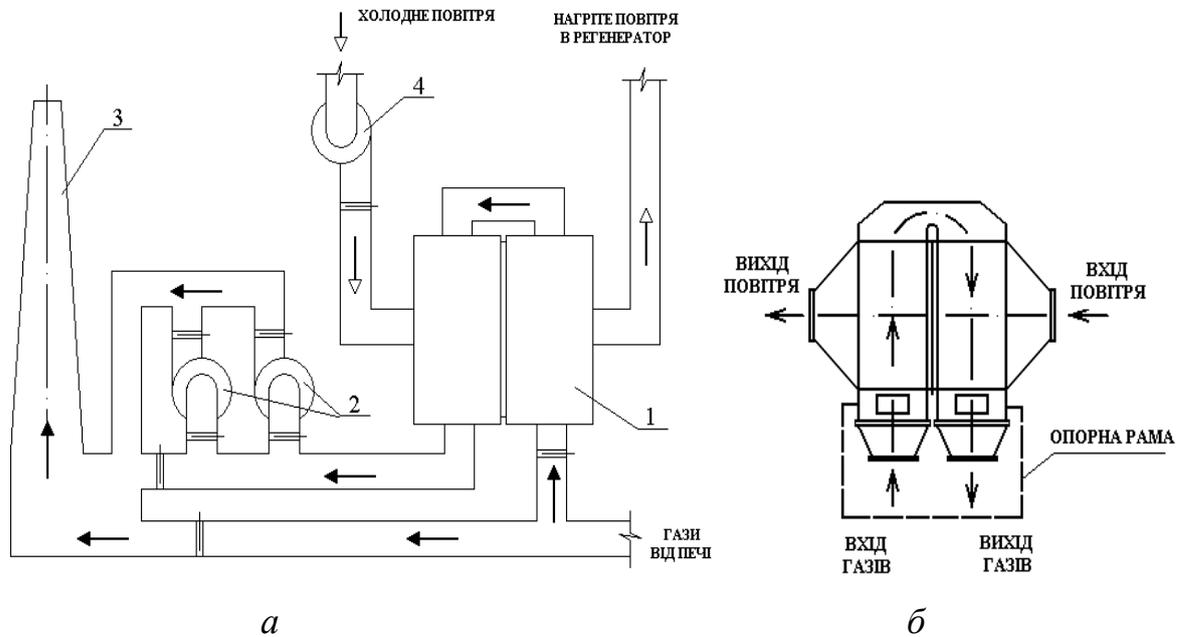


Рис. 1. Схема теплоутилізаційної установки (а) з рекуператором (повітрогрійним теплоутилізатором) (б), призначеним для попереднього підігрівання холодного повітря перед надходженням його до регенераторів печі: 1 – теплоутилізатор; 2 – димосос; 3 – димова труба; 4 – вентилятор; \rightarrow \rightarrow – напрямки потоків повітря і димових газів; \dashv – газохід, повітропровід; \equiv – шибер.

Результати досліджень та їх обговорення. Комплексна методика, що використовувалась для дослідження, поєднує методи багаторівневої оптимізації, статистичної теорії планування експерименту та функціонального аналізу. Основний принцип методу багаторівневої оптимізації полягає в такому. При побудові математичної моделі кожного рівня оптимізації в якості змінних параметрів використовуються параметри об'єктів даного рівня, що варіюються, а в якості постійних – оптимальні параметри, які є результатами вирішення локальних оптимізаційних задач інших рівнів. Основна задача при використанні статистичних методів теорії планування експерименту та методів функціонального аналізу – визначення функціональних залежностей цільових функцій оптимізації від

параметрів, що підлягають оптимізації. В якості цільових функцій оптимізації використано критерії оцінки ефективності теплоутилізаційних систем та їх окремих елементів: ексергетичні втрати $E_{\text{втр}}$, енергетичний критерій Кирпичова $k=Q/N$, тепло-ексергетичний критерій $\varepsilon= E_{\text{втр}} /Q$, ексерго-технологічний критерій $k_{\text{ex}}^T = E_{\text{втр}}m/Q^2$, питому матеріалоємність $m_0= m/Q$, де Q , N , m – теплопродуктивність, потужність, маса теплоутилізаційної системи або рекуператора. В якості параметрів, що підлягають оптимізації, розглядалися режимні та конструкційні параметри. При використанні статистичних методів теорії планування експерименту задачі вирішується за допомогою матриці планування експерименту, на основі якої визначаються коефіцієнти зазначених функціональних залежностей. Для досліджуваної теплоутилізаційної системи розроблено схему багаторівневої оптимізації та схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації. На основі статистичних методів планування експерименту та методів функціонального аналізу розроблено математичні моделі для кожного рівня оптимізації, отримано функціональні залежності критеріїв оцінки ефективності системи та рекуператора від їх основних параметрів та визначено значення оптимальних параметрів теплоутилізаційної системи (рис. 2, таблиця).

Використана методика дозволяє визначати параметри теплоутилізаційної системи з рекуператором скловарної печі, максимально наближені до оптимальних, що підвищує ефективність системи у середньому на 2,5 – 3 % порівняно з системою, яку оптимізовано з використанням інших методик оптимізації.

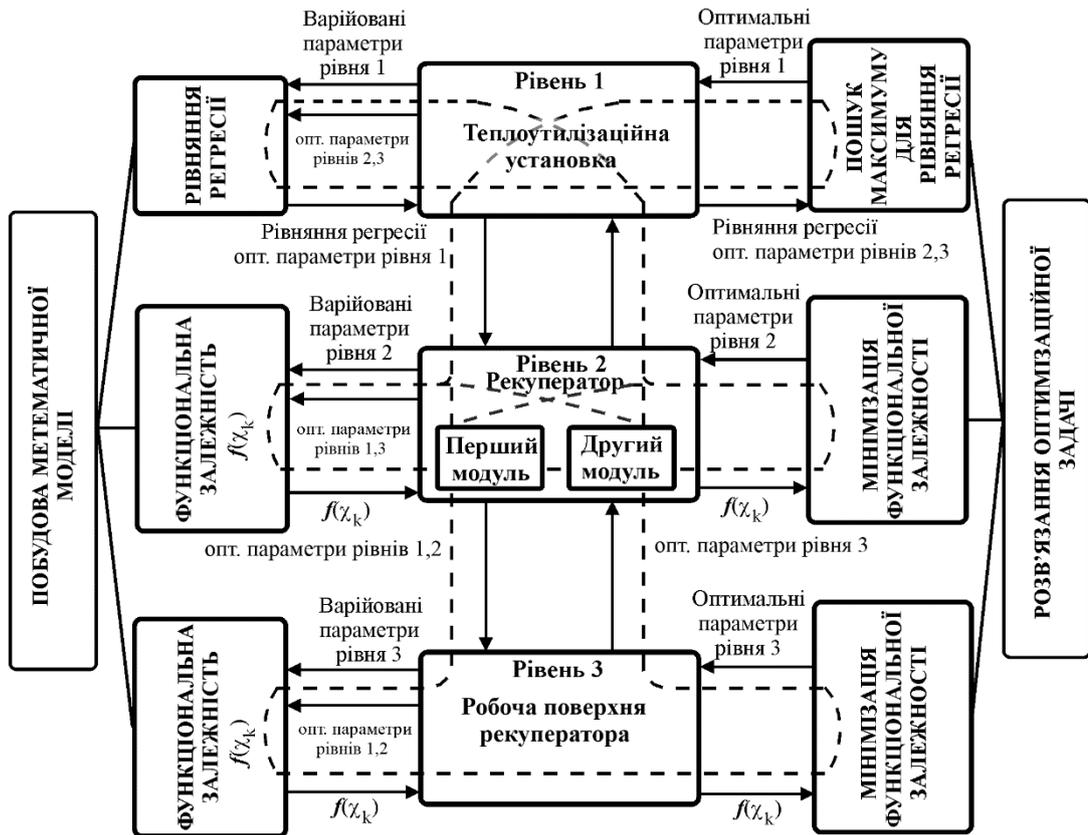


Рис. 2. Схема багаторівневої оптимізації теплоутилізаційної системи з рекуператором скловарної печі

Результати розрахунків оптимальних параметрів теплоутилізаційної системи з рекуператором скловарної печі

Рівень оптимізації	Параметри	Оптимальні значення параметрів
Теплоутилізаційна система	Швидкість димових газів, м/с	8,5
	Швидкість повітря, м/с	13,0
	Початкова температура димових газів, °С	425,0
Рекуператор	Коефіцієнт турбулізації повітря	2,0
	Коефіцієнт забруднення поверхні	0,01
	Відношення чисел Рейнольдса димових газів і повітря	2,0
Робоча поверхня рекуператора	Відстань між панелями, мм	70,0
	Відстань між трубами в панелі, мм	72,0
	Зовнішній діаметр труби, мм	42,0

Висновки і перспективи

1. За допомогою комплексної методики, заснованої на методах багаторівневої оптимізації, статистичної теорії планування експерименту та функціонального аналізу, виконано дослідження параметрів теплоутилізаційної системи з рекуператором скидної теплоти скловарної печі регенеративного типу.

2. Відповідно до принципів багаторівневої оптимізації розроблено схему багаторівневої оптимізації та схему рекурсивного обходу рівнів оптимізації для досліджуваної теплоутилізаційної системи.

3. На основі статистичних методів планування експерименту та методів функціонального аналізу розроблено математичні моделі для кожного рівня оптимізації та отримано функціональні залежності критеріїв оцінки ефективності від основних параметрів системи.

4. Визначено оптимальні значення режимних та конструкційних параметрів теплоутилізаційної системи з рекуператором скидної теплоти скловарної печі регенеративного типу, що надає можливість розробки теплоутилізаційних систем підвищеної ефективності.

Список використаних джерел

1. Pina, E. A., Lozano, M. A., & Serra, L. M. (2018). Thermoeconomic cost allocation in simple trigeneration systems including thermal energy storage. *Energy*, 153, 170-184. doi: 10.1016/j.energy.2018.04.012
2. Kharlampidi, D., Tarasova, V., Kuznetsov, M., & Voytenko, E. (2017). Thermodynamic analysis of air-compression refrigerating machine based on the exergy cost theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, (5 (8)), 30-38. doi:10.15587/1729-4061.2017.112113
3. Zhang, H., Liu, X., Kong, X., & Lee, K. Y. (2019). Stacked auto-encoder modeling of an ultra-supercritical boiler-turbine system. *Energies*, 12(21), 4035. doi:10.3390/en12214035
4. Sun, L., Li, D., Lee, K. Y., & Xue, Y. (2016). Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit. *Control Engineering Practice*, 55, 38-55. doi: 10.1016/j.conengprac.2016.06.013
5. 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. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (8 (96)), 43-48. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.147526
6. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., & Shevchuk, S. (2021). Comparative analysis of the exergy efficiency of methods for protecting gas exhaust ducts of boiler plants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (111)), 42-49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.234026>
7. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., Gnedash, G., & Shevchuk, S. (2021). Complex methods for analysis of efficiency and optimization of heat-recovery system. *Scientific and innovation*, 17(4), 11-18. Doi.org/ 10.15407/scine17.04.01

8. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., & Novakovsky, M. (2019). Study of the efficiency of a combined heat utilization system using the graph theory methods. *International scientific journal "Internauka"*, 15(1), 61-63. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-15>
9. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., & Presich, G. (2019). Localization of exergy losses in the air heater of the heat-recovery system under different boiler operating modes. *International scientific journal "Internauka"*, 12(74), 30-33. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-12>
10. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Пресіч Г.О. Особливості застосування теплоутилізаційних технологій для газоспоживальних скловарних печей. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т.31, №4. С. 109–113. <https://doi.org/10.36930/40310418>

References

1. Pina, E. A., Lozano, M. A., & Serra, L. M. (2018). Thermoeconomic cost allocation in simple trigeneration systems including thermal energy storage. *Energy*, 153, 170-184. doi: 10.1016/j.energy.2018.04.012
2. Kharlampidi, D., Tarasova, V., Kuznetsov, M., & Voytenko, E. (2017). Thermodynamic analysis of air-compression refrigerating machine based on the exergy cost theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, (5 (8)), 30-38. doi:10.15587/1729-4061.2017.112113
3. Zhang, H., Liu, X., Kong, X., & Lee, K. Y. (2019). Stacked auto-encoder modeling of an ultra-supercritical boiler-turbine system. *Energies*, 12(21), 4035. doi:10.3390/en12214035
4. Sun, L., Li, D., Lee, K. Y., & Xue, Y. (2016). Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit. *Control Engineering Practice*, 55, 38-55. doi: 10.1016/j.conengprac.2016.06.013
5. 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. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (8 (96)), 43-48. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.147526
6. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., & Shevchuk, S. (2021). Comparative analysis of the exergy efficiency of methods for protecting gas exhaust ducts of boiler plants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (111)), 42–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.234026>
7. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., Gnedash, G., & Shevchuk, S. (2021). Complex methods for analysis of efficiency and optimization of heat-recovery system. *Scientific and innovation*, 17(4), 11-18. <https://doi.org/10.15407/scine17.04.01>
8. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., & Novakovsky, M. (2019). Study of the efficiency of a combined heat utilization system using the graph theory methods. *International scientific journal "Internauka"*, 15(1), 61-63. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-15>
9. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska, R., & Presich, G. (2019). Localization of exergy losses in the air heater of the heat-recovery system under different boiler operating

modes. International scientific journal "Internauka", 12(74), 30-33.
<https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-12>

10. Fialko, N., Prokopov, V., Navrodska, R., Shevchuk, S. & Presich, G. (2021). Osoblyvosti zastosuvannia teploutylizatsiinykh tekhnolohii dlia hazospozhyvalnykh sklovarnykh pechei [Some features of the heat recovery technologies application for gas-fired glass furnaces]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(4), 109-113.
<https://doi.org/10.36930/40310418>

OPTIMIZATION OF HEAT RECOVERY SYSTEM PARAMETERS WITH A GLASS FURNACE RECUPERATOR

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

Abstract. *The modern development of the energy sector is characterized by a significant increase in the cost of energy and natural resources, as well as growing requirements for environmental protection from the impact of waste produced by municipal and industrial enterprises. Currently, the problem of energy saving in the municipal heat-power engineering is to some extent solved by recovering the heat of fuel combustion materials. Increasing the efficiency of the relevant heat recovery equipment is important and urgent.*

The purpose of the study is to optimize the parameters of a heat recovery system with a regenerative-type industrial furnace recuperator based on a complex multi-level optimization, statistical theory of experiment planning, and functional analysis.

To achieve this purpose, the following tasks were set: to develop a multi-level optimization scheme and a recursive bypass scheme of optimization levels for a heat recovery system with a glass melting furnace recuperator; to develop mathematical models for each optimization level and obtain functional dependencies of the system efficiency assessment criteria on the main parameters based on statistical methods of experiment planning and functional analysis methods; to determine the optimal values of the operating and constructive parameters of the heat recovery system.

The basic principle of the multi-level optimization method is as follows. When constructing a mathematical model of each optimization level, the variable parameters are the parameters that vary for the objects of this level, and the constant parameters are the optimal parameters that are the results of solving local optimization problems of other levels. The main task when using the statistical methods of the experiment planning theory and functional analysis methods is to determine the functional dependencies of the criteria for assessing of the studied heat recovery system efficiency on its main parameters.

The research results of the operating and constructive parameters of a heat recovery system that includes a waste heat recuperator of a regenerative type gas-consuming industrial furnace are presented. The recuperator is designed to heat the combustion air by heat recovering of the exhaust gases after the furnace regenerators. The recuperators are assembled of the required number of modules depending on the exhaust gas consumption. The heat exchange surface of the module is made up of steel panels formed by pipes with membranes. Exhaust gases move in the inter-panel space, and air moves in the pipe space. To intensify heat transfer from the air side, the pipes have with flow turbulators.

A multi-level optimization scheme and a recursive bypass scheme of optimization levels for the studied heat recovery system were developed. The optimal values of the operating and constructive parameters of the heat recovery system using the specified complex methodology were calculated. The methodology allows you to determine the parameters that are as close to optimal as possible. This increases the heat recovery efficiency of exhaust gases by an average of 2.5% to 3% compared to the efficiency of systems optimized using other optimization methods.

Key words: *heat recovery; heat recovery of exhaust gases; complex research methods*