

УДК 536.24:621.184.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВОК ТЕРМІЧНОГО ЗНЕШКОДЖЕННЯ  
ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ШЛЯХОМ УТИЛІЗАЦІЇ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ**

**Фіалко Н.М.<sup>1</sup>, Навродська Р.О.<sup>2</sup>, Шевчук С.І.<sup>3</sup>, Гнєдаш Г.О.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>член-кореспондент НАН України, зав. відділу, професор, [orcid.org/0000-0003-0116-7673](https://orcid.org/0000-0003-0116-7673), e-mail: [nmfialko@ukr.net](mailto:nmfialko@ukr.net)

<sup>2</sup>канд. техн. наук, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, [orcid.org/0000-0001-7476-2962](https://orcid.org/0000-0001-7476-2962), e-mail: [navrodska-ittf@ukr.net](mailto:navrodska-ittf@ukr.net)

<sup>3</sup>канд. техн. наук, ст. наук. співр., [orcid.org/0000-0001-8046-0039](https://orcid.org/0000-0001-8046-0039), e-mail: [s.i.shevchuk@gmail.com](mailto:s.i.shevchuk@gmail.com)

<sup>4</sup>канд. техн. наук, ст. наук. співр., [orcid.org/0000-0003-0395-9615](https://orcid.org/0000-0003-0395-9615), e-mail: [navrodska-ittf@ukr.net](mailto:navrodska-ittf@ukr.net)

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.10>

*Наведено результати досліджень щодо створення утилізатора скидної теплоту димових газів установок спалювання побутових відходів. Запропоновано нове технічне рішення повітрогрійного теплоутилізатора з можливістю очищення робочих поверхонь від відкладень пилу. Встановлено закономірності зміни основних показників теплоутилізатора в різних режимах експлуатації протягом року в практичному діапазоні зміни вхідних параметрів теплоносіїв.*

*The research results on the creation of recovery exchanger for waste heat exhaust gases of household waste incineration plants are presented. A new technical solution for an air-heating heat recovery exchanger with the ability to clean working surfaces from dust deposits is proposed. The regularities of changes in the main indicators of the heat recovery exchanger in different operating modes during the year in the practical range of changes in heat-transfer-agents input parameters were established.*

Бібл. 8, табл. 1, рис. 4.

**Ключові слова:** повітрогрійний теплоутилізатор, труби з мембранами, тепла ефективність, очищення поверхні теплообміну.

$Q$  – теплопродуктивність, кВт;

$t$  – температура, °С;

$\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря;

**Індекси:**

вих – на виході;

вх – на вході;

г – гази;

нс – навколишнє середовище;

п – повітря;

ут – утилізатор.

**Вступ**

Термічне знешкодження твердих побутових відходів (ТПВ) є одним із способів боротьби з їхніми екологічними загрозами [1, 2]. Технології термічного знешкодження ТПВ охоплюють сукупність технологій, які безпосередньо спалюють побутові відходи з відновленням енергії для вироблення електричної і теплової енергії. Ці технології є досить різноманітними і мають широке застосування в розвинених країнах світу [3, 4]. Під час вибору технології термічного знешкодження побутових відходів необхідно враховувати багато факторів технічного і вартісного характеру стосовно умов її конкретного застосування. Важливими завданнями створення сміттєспалювальних установок (ССУ) є забезпечення ефективного спалювання ТПВ і глибока рекуперація утвореної теплоту. Глибина рекуперації пов'язана зі зменшенням обсягів скидного тепла шляхом утилізації теплоту відпрацьованих димових газів.

Утилізація теплоту димових газів є досить складним завданням через вміст у продуктах згоряння сміттєспалювальних установок хімічно агресивних сполук у газоподібному стані, а також твердого виносу різного хімічного та фракційного складу у вигляді пилу. Тому одним із основних завдань під час створення і експлуатації систем рекуперації скидної теплоту димових газів є використання в цих системах спеціального теплообмінного устаткування (теплоутилізаторів), що характеризується високою тепловою ефективністю, стійкістю робочих поверхонь до корозійної та ерозійної дії димових газів, можливістю часткового самоочищення цих поверхонь від відкладень пилу та у разі необхідності примусового їх очищення.

**Мета роботи і постановка завдань досліджень**

Метою роботи є розроблення технічного рішення теплоутилізатора димових газів установок спалювання сміття та визначення показників його теплової ефективності.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

- ознайомитись з досвідом використання сучасних ССУ та встановити основні складові димових газів;
- визначити вимоги та вихідні дані для створення теплоутилізатора ССУ та розробити його технічне рішення;
- встановити закономірності зміни основних теплових показників теплоутилізатора в різних режимах експлуатації ССУ.

**Методика проведення досліджень.**

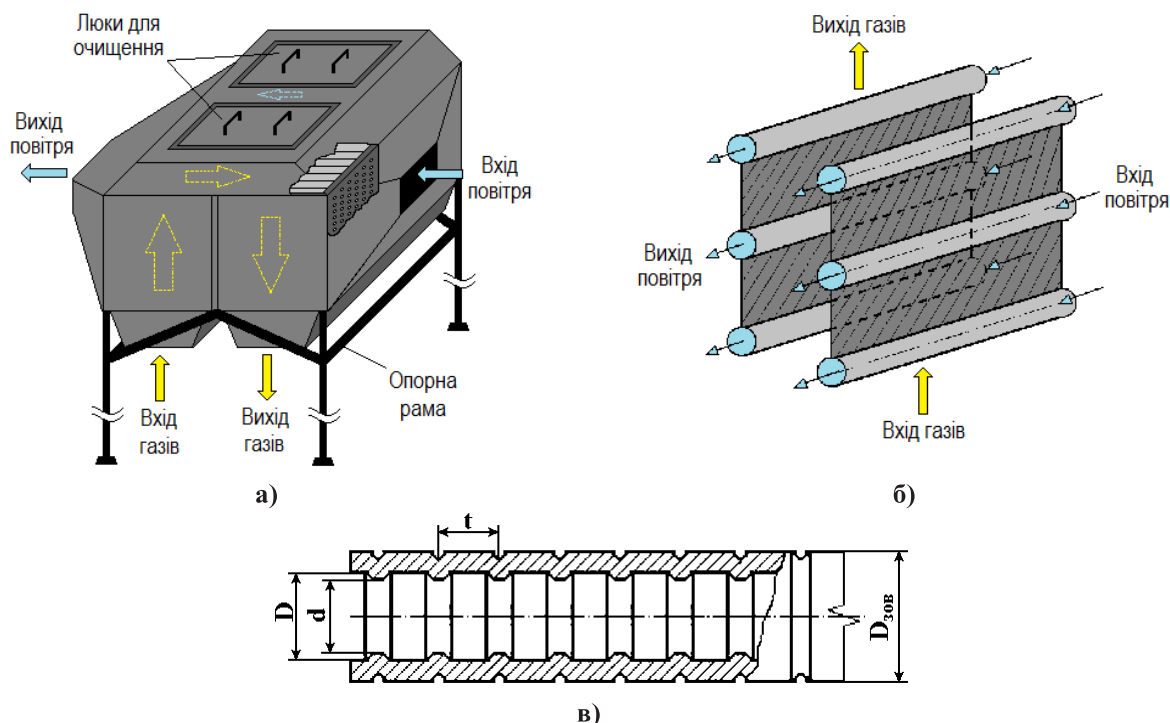
Розроблення теплоутилізатора базувалося на основі аналізу досвіду експлуатації установок термічного знешкодження побутових відходів та багаторічному досвіді авторів щодо створення і впровадження теплоутилізаційного устаткування за скловарними печами [5, 6], які характеризуються високим рівнем запиленості та агресивності димових газів.

Розрахункові дослідження виконувались з використанням відомих методів теплового розрахунку теплообмінного устаткування та результатів досліджень процесів тепло-масопереносу і гідродинаміки у водогрійних теплообмінних апаратах систем утилізації теплоти промислових скловарних печей різного типу [6, 7].

**Результати.**

На основі аналізу досвіду експлуатації установок термічного знешкодження побутових відходів було встановлено, що в їхніх димових газах наявні оксиди вуглецю, азоту, сірки, аміак, бромоводень, хлористий, фтористий та йодистий водень та інші шкідливі сполуки, а також тверді частинки (пил). Цей пил містить переважно негорючі речовини, що входять до складу сміття, та продукти неповного згоряння, які існують у твердій або аерозольній формі. Концентрація твердих частинок у димових газах коливається здебільшого від 200 до 50000 мг на 1м<sup>3</sup> сухих димових газів [8]. Тому основними вимогами до створення теплоутилізаційного устаткування ССУ є, як зазначалось, забезпечення його високої теплової ефективності, стійкості робочих поверхонь до корозійної дії димових газів, можливості очищення цих поверхонь від відкладень технологічного пилу.

На основі висунутих вимог запропоновано технічне рішення теплоутилізатора для технологічної схеми сміттєспалювальної установки з використанням турбіни. Теплоутилізатор призначений для нагрівання повітря на горіння ССУ шляхом рекуперації теплоти відпрацьованих димових газів, що відходять після турбіни. Рис. 1а ілюструє схематичне зображення цьо-



**Рис. 1. Схематичне зображення повітрогрійного теплоутилізатора ССУ та його теплообмінної поверхні: а – загальний вигляд; б – теплообмінна поверхня з напрямком руху теплоносіїв; в – труба з кільцевими турбулізаторами потоку**

го устаткування, а рис. 1б – схему його теплообмінної поверхні з рухом теплоносіїв.

Теплообмінна поверхня теплоутилізатора являє собою пакет сталевих панелей, утворених трубами з мембранами. На поверхню панелей з газового боку може бути нанесене захисне антикорозійне покриття. Застосовувані в панелях труби мають кільцеві турбулізатори потоку (рис. 1в) певних геометричних розмірів, які забезпечують інтенсифікацію теплообміну на їхніх внутрішніх поверхнях в 1,4 – 1,8 разів за умов помірного, порівняно з іншими методами інтенсифікації теплообміну, зростання аеродинамічного опору. Рух теплоносіїв перехреснотоканий з проходженням димових газів у міжпанельному просторі, а повітря в трубах. Конструкційне виконання теплоутилізатора дозволяє здійснювати примусове очищення панелей з газового боку стисненим повітрям через спеціальні отвори.

Досвід експлуатації за скловарними печами [4 – 6] водогрійного теплоутилізаційного устаткування, конфігурація теплообмінної поверхні якого відповідає з газового боку конфігурації пропонованого повітрогрійного теплоутилізатора, свідчить, що конструкційне виконання панелей сприяє зменшенню їх запиленості в процесі експлуатації теплоутилізатора. Отриманий досвід свідчить також про високу ефективність очищення цієї поверхні стисненим повітрям. Таке примусове видалення відкладень пилу дозволяє практично відновлювати початкову теплопродуктивність теплоутилізатора.

Виконано розрахункові дослідження щодо показників теплової ефективності розробленого повітрогрійного теплоутилізатора димових газів у разі його використання для сміттєспалювальної установки. Дослідження виконувались в різних режимах експлуатації теплоутилізатора протягом року, а саме: за різних вхідних температур димових газів і повітря, вологості димових газів, коефіцієнта надлишку повітря, рівня запиленості

Таблиця 1. Вихідні дані

Найменування характеристики, розмірність	Значення
Витрата димових газів, кг/с	1,8
Коефіцієнт надлишку повітря	1,5 – 2,0
Температура димових газів на вході, °С	200 – 300
Температура повітря на вході, °С	-20 – 20
Вологовміст димових газів на вході, кг/кг с.г.	150 – 200
Коефіцієнт запиленості теплообмінної поверхні	0,5 – 1,0

поверхні нагрівання тощо. Вихідні режимні параметри (табл. 1) для виконання розрахунків теплоутилізатора приймалися в їхньому практичному діапазоні на 1 тону ТПВ згідно з літературними даними [3, 4]. Вказаний в таблиці коефіцієнт запиленості визначає рівень зниження теплопродуктивності теплоутилізатора за наявності відкладень пилу.

Результати визначення основних характеристик теплоутилізатора за відсутності забруднень на його теплообмінній поверхні наведено на рис. 2, 3. Рис. 2 ілюструє закономірності зміни температури димових газів та повітря в різних режимах експлуатації теплоутилізатора протягом року за різних коефіцієнтів надлишку повітря в димових газах.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що застосування пропонованого теплоутилізатора протягом року за різних значень коефіцієнта надлишку повітря в димових газах забезпечує їх охолодження до температури 107 – 152 °С та нагрівання повітря – до 131 – 151 °С для початкової температури газів  $t_{\text{вх}}^f = 200$  °С. У разі підвищення за тих же умов температури  $t_{\text{вх}}$  до 300 °С досягається вищий рівень підігрівання повітря (до температури 198 – 220 °С), але реалізується і збільшення вихідної температури димових газів в межах 168 – 227 °С.

Слід зазначити, що зменшення коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  з 2,5 до 1,5 відповідає підвищенню рівня кінцевої температури повітря: на 9 – 11 °С для  $t_{\text{вх}}^f = 200$  °С та на 13 – 14 °С для  $t_{\text{вх}}^f = 300$  °С. Таке підвищення не є суттєвим, зважаючи на відносно значне зменшення обсягів нагріваного повітря. Це пояснюється здебільшого тим, що за менших коефіцієнтів надлишку повітря відбувається зменшення швидкості його течії в трубах з кільцевими турбулізаторами потоку, яке зумовлює деяке зниження інтенсифікації теплообміну. Дана обставина вказує на те, що для ефективної експлуатації теплоутилізатора його конструкційне виконання повинно відповідати реальним режимам роботи зі зміною  $\alpha$  в невеликих межах.

Розрахункові дані щодо закономірностей зміни за розглянутих умов теплопродуктивності теплоутилізатора  $Q_{\text{ут}}$  протягом року наведено на рис. 3. За результатами досліджень значення  $Q_{\text{ут}}$  змінюється в діапазоні 95 – 263 кВт. Причому величина  $Q_{\text{ут}}$  зростає з підвищенням початкової температури димових газів та коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  і зменшується з підвищенням його температури  $t_{\text{вх}}$ .

За результатами досліджень також встановлено, що за розглянутих умов зміна початкового вологовмісту димових газів не впливає на їхній кінцевий вологовміст. Тобто в процесі теплоутилізації не реалізується глибоке охолодження цих газів, що убезпечує в процесі

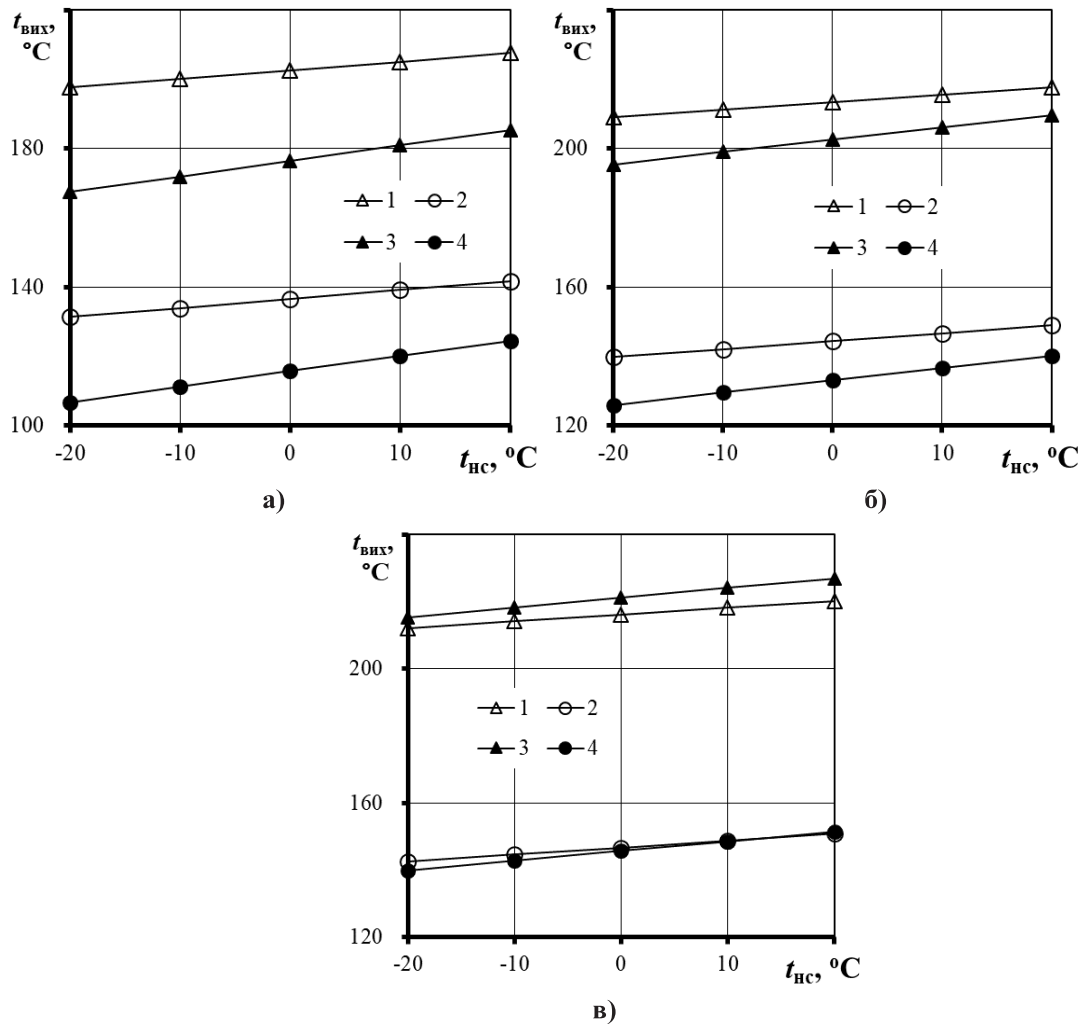


Рис. 2. Залежність температур повітря  $t_{\text{вих}}^n$  (1, 2) та димових газів  $t_{\text{вих}}^g$  (3, 4) на виході з теплоутилізатора від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}^n$  за різних температур димових газів на вході  $t_{\text{вх}}^g$  та коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 1,5$  (а),  $\alpha = 2,0$  (б) та  $\alpha = 2,5$  (в): 1, 3 –  $t_{\text{вх}}^g = 300$  °C; 2, 4 –  $t_{\text{вх}}^g = 200$  °C

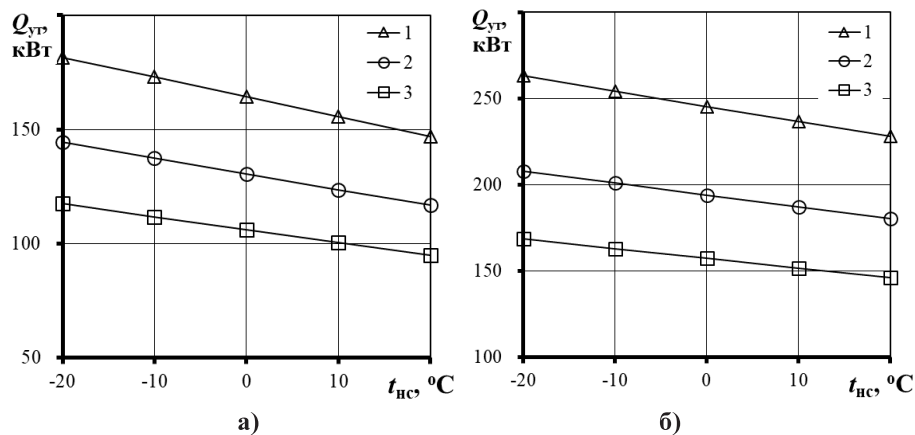


Рис. 3. Залежність теплопродуктивності теплоутилізатора від температури навколишнього середовища  $t_{\text{нс}}^n$  за різних коефіцієнтів надлишку повітря та температури відхідних газів на вході:  
а)  $t_{\text{вх}}^g = 200$  °C, б)  $t_{\text{вх}}^g = 200$  °C. 1 –  $\alpha = 1,5$ ; 2 –  $\alpha = 2,0$ ; 3 –  $\alpha = 2,5$

експлуатації робочі поверхні теплоутилізатора від корозійної дії конденсату, в якому зазвичай розчинюються корозійно активні сполуки, що містяться в димових газах.

Виконано також дослідження щодо температурних показників теплоносіїв теплоутилізатора за наявності забруднень на його теплообмінній поверхні. Дослідження виконувались в діапазоні значень коефіцієнта запиленості  $k$  від 0,5 до 1. Значення  $k = 0,5$  відповідає зниженню теплопродуктивності  $Q_{ут}$  вдвічі за інших рівних умов. Аналіз отриманих результатів свідчить, що величина кінцевої температури нагріваного повітря за значень  $k = 0,5$  зменшується в 1,3 – 1,4 рази і мінімальне її значення становить  $96^{\circ}\text{C}$ . За цих умов підвищується кінцева температура димових газів в 1,1 – 1,2 рази до максимального значення  $245^{\circ}\text{C}$ , що свідчить про недостатній рівень використання їхньої теплоти і необхідність здійснення примусового видалення пилових забруднень з поверхні теплообміну, як це і передбачено технічним рішенням теплоутилізатора.

На рис. 4 до прикладу наведено результати досліджень щодо залежності теплопродуктивності  $Q_{ут}$  теплоутилізатора від рівня запиленості теплообмінних поверхонь  $k$  за різних значень вхідних температур теплоносіїв (димових газів та повітря) та коефіцієнта надлишку повітря в димових газах  $\alpha = 2,0$ .

Наведені дані свідчать, що значення теплопродуктивності  $Q_{ут}$  за наявності відкладень пилу на теплообмінній поверхні за розглянутих умов змінюється в діапазоні 88 – 216 кВт. І це значення тим більше, чим

менший рівень запиленості поверхні, нижча вхідна температура нагріваного повітря та вища температура димових газів більший коефіцієнт надлишку повітря. Так у разі  $\alpha = 2,5$  мінімальна величина  $Q_{ут}$  в процесі експлуатації теплоутилізатора знижується до 72 кВт. Для підвищення теплопродуктивності  $Q_{ут}$  необхідно виконувати періодичне очищення теплоутилізатора.

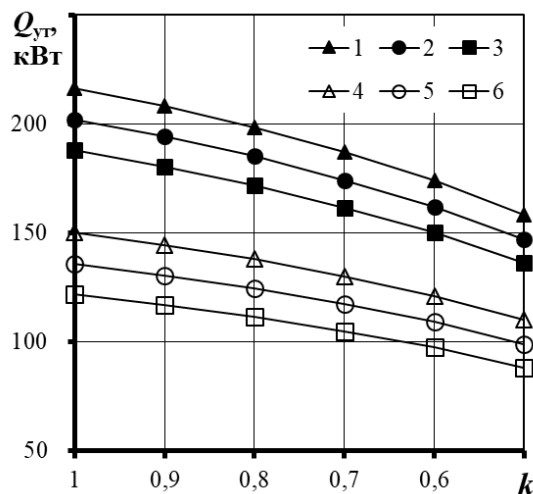
Максимальний рівень забрудненості поверхні, за якого необхідно здійснювати примусове видалення пилових відкладень визначається конкретними умовами експлуатації теплоутилізатора, а саме: швидкістю запилення поверхні нагрівання, необхідним рівнем кінцевої температури повітря, умовами технічної реалізації процесу очищення тощо.

**Висновки.**

1. Розроблено нове технічне рішення повітрогрійного теплоутилізатора для установок термічного знешкодження побутових відходів, яке характеризується високою тепловою ефективністю, стійкістю робочих поверхонь до корозії та можливістю примусового очищення цих поверхонь від відкладень пилу.

2. Виконано розрахункові дослідження та визначено основні показники теплової ефективності розробленого теплоутилізатора в залежності від початкових температур димових газів та повітря, коефіцієнта його надлишку в газах, рівня запиленості робочої поверхні та за наявності антикорозійного покриття і без нього. При цьому показано, що застосування теплоутилізатора забезпечує:

- теплопродуктивність 72 – 263 кВт;



**Рис. 4. Залежність теплопродуктивності  $Q_{ут}$  теплоутилізатора від коефіцієнта забрудненості  $k$  теплообмінної поверхні за різних значень температури вхідних газів і повітря на вході та коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 2,0$ : 1-3 –  $t_{вх} = 300^{\circ}\text{C}$ , 4-6 –  $t_{вх} = 300^{\circ}\text{C}$ ; 1, 4 –  $t_{нс} = -20^{\circ}\text{C}$ ; 2, 5 –  $t_{нс} = 0^{\circ}\text{C}$ ; 3, 6 –  $t_{нс} = +20^{\circ}\text{C}$**

- охолодження димових газів до температури 107 – 245 °С;

- нагрівання повітря до 96 – 220 °С.

2. Встановлено, що відкладення пилу на теплообмінній поверхні призводить до зменшення температури нагріваного повітря в 1,3 – 1,4 рази та підвищення кінцевої температури димових газів в 1,1 – 1,2 рази. При цьому теплопродуктивність теплоутилізатора зменшується вдвічі.

3. Для підвищення ефективності теплоутилізації необхідно виконувати очищення робочих поверхонь у відповідності з технічним рішенням теплоутилізатора.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Johnke B.* Emissions from waste incineration. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. 2000. P. 455–468.

2. *Магера Ю. М.* Підвищення ефективності термічної інсінерації твердих побутових відходів: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.06 / Ін-т технічної теплофізики НАНУ Київ, 2019. 161с.

3. *Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices – Final Report*, Stantec, 2011. 88p.

4. *Крот О. П.* Моделювання та оптимізація процесів термічного знешкодження побутових і промислових відходів у теплогенеруючих установках: дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.03 / Харківський нац. універ. буд. та архіт., Харків, 2019. 329 с.

5. *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>

6. *Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Степанова А.І.* Результати експериментальних досліджень теплотехнічних характеристик водогрійних теплоутилізаторів промислових печей. Теплофізика та теплоенергетика. 2022. т. 44, №1. С. 84–91. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2022.10>.

7. *Фіалко Н.М., Навродская Р.А., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Сарюгло А.Г.* Утилизация теплоты отходящих газов стекловаренных печей с использованием мембранных труб. Киев: «София-А». 2016. 214с. ISBN 978-966-02-7982-7.

8. *National Research Council.* (2000). Waste incineration and public health. ISBN: 0-309-50446-5, 364 pages (Waste Incineration and Public Health is available from the National Academy Press, 2101 Constitution Ave., NW, Box 285, Washington, DC 20055 (1-800-624-6242 or 202-334-3313 in the Washington metropolitan area; Internet: <http://www.nap.edu>).

## IMPROVING THE PLANTS EFFICIENCY OF THERMAL INCINERATION HOUSEHOLD WASTE BY RECOVERING WASTE HEAT

Fialko N.M.<sup>1</sup>, Navrodska R.<sup>2</sup>, Shevchuk S.<sup>3</sup>, Gnedash G.<sup>4</sup>

*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine*

<sup>1</sup>*Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of Department, Professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net*

<sup>2</sup>*PhD (Engin.), Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net*

<sup>3</sup>*PhD (Engin.), Senior Researcher, orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com*

<sup>4</sup>*PhD (Engin.), Senior Researcher, orcid.org/0000-0003-0395-9615, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.10>

The work is devoted to research on the creation of recovery exchanger for waste heat exhaust gases of household waste incineration plants. The purpose of the work is to develop a technical solution for the heat recovery exchanger of waste incineration plants (WIP) and determine its thermal efficiency indicators. The main objectives of the study were to analysis of the modern experience of using the WIP and establish requirements for the creation of the exhaust gas heat recovery exchanger, develop a new technical solution for the heat recovery exchanger, and determine the change patterns in its main thermal indicators in different operating modes of the WIP. The known methods of thermal calculation of heat exchangers and the results of previous studies on the development and implementation of heat recovery equipment operating on dusty gases were used. The results of work on the creation of a new technical solution for an air-heating heat recovery exchanger with the ability to clean working surfaces from dust deposits are presented. The heat exchange surface of the heat recovery exchanger is composed of steel panels formed by tubes with membranes. The tubes applied have circular flow turbulizers on their internal surfaces. Turbulizers provide heat transfer intensification by 1.4 to 1.8 times with a moderate increase in aerodynamic resistance compared to other methods of heat transfer intensification. The

regularities of changes in the main indicators of the heat recovery unit in different operating modes during the year in the practical range of changes in its input parameters were established. The research results show that, depending on the initial temperatures of gases and air, the excess air ratio in exhaust gases and the dust level of the working surface, the heat recovery exchanger provides heating capacity of 72-263 kW; cooling of exhaust gases to a temperature of 107-245 °C; heating of air to 96-220 °C. It was also established that the deposition of dust on the heat exchange surface of the heat recovery unit under the considered conditions leads to a decrease in the heating air temperature by 1.3-1.4 times and an increase in the final exhaust gas temperature by 1.1-1.2 times. At the same time, the heating capacity of the heat recovery exchanger is reduced by half. To increase heat recovery efficiency, it is necessary to periodically clean the working surfaces of the heat recovery unit with compressed air.

References 8, tables 1, figures 4.

**Key words:** air-heating heat recovery exchanger, tubes with membranes, thermal efficiency, cleaning the heat exchange surface.

1. *Johnke B.* Emissions from waste incineration. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. 2000. P. 455–468.

2. *Magera Y.M.* Pidvyshchennia efektyvnosti termichnoi insineratsii tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Improving of the efficiency of municipal solid waste thermal incineration]: manuscript ... PhD (Engin.): 05.14.06 / Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. Kyiv, 2019. 161p. (in Ukr.)

3. *Waste to Energy: A Technical Review of Municipal Solid Waste Thermal Treatment Practices – Final Report*, Stantec, 2011. 88p.

4. *Krot O.P.* Modeliuvannia ta optymizatsiia protsesiv termichnogo zneshkodzhennia pobutovykh i promyslovykh vidkhodiv u teplogeneruiuchykh ustanovkakh [Modeling and optimization of incineration processes of household and industrial wastes to heat generating plants]: manuscript ... Dr. Sci. (Engin.): 05.23.03 / Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, 2019. 329 p. (in Ukr.)

5. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Presich G.O.* Osoblyvosti zastosuvannia teploutylizatsiynykh tekhnologiy dlia gazospozhyvalnykh sklovarnykh pechey [Some features of the heat recovery technologies application for gas-fired glass furnaces]. Scientific Bulletin of UNFU. 2021. No 31(4). P. 109–113. <https://doi.org/10.36930/40310418> (in Ukr.).

6. *Fialko N.M., Prokopov V.H., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Stepanova A.I.* Rezultaty eksperymentalnykh doslidzhen teplotekhnichnykh kharakterystyk vodohriinykh teploutylizatoriv promyslovykh pechei [Results of experimental studies of the heat engineering characteristics of industrial furnace water-heating heat recovery units Thermophysics and Thermal Power Engineering. 2022. Vol. 44, №1, P. 84–91. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2022.10>. (in Ukr.).

7. *Fialko N.M., Navrodskaia R.A., Sherenkovskii Yu.V., Stepanova A.I., Sariohlo A.G.* Utilizatsiia teploty otkhodiashchikh gazov steklovarenykh pechei s ispolzovaniem membrannykh trub [Heat recovery of exhaust gases from glass furnaces using membrane tubes]. K.: «Sophia-A». 2016. 214p. ISBN 978- 966-02-7982-7. (in Rus.).

8. *National Research Council.* (2000). Waste incineration and public health. ISBN: 0-309-50446-5, 364 pages (Waste Incineration and Public Health is available from the National Academy Press, 2101 Constitution Ave., NW, Box 285, Washington, DC 20055 (1-800-624-6242 or 202-334-3313 in the Washington metropolitan area; Internet: <http://www.nap.edu>).

*Отримано 03.01.2024*

*Received 03.01.2024*

*Прийнято до друку 15.02.2024*  
*Accepted for publication 15.02.2024*