

УДК 536.24:621.184.5

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВОК СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВ З ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ШЛЯХОМ УТИЛІЗАЦІЇ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ

Фіалко Н.М.¹, Навродська Р.О.², Шевчук С.І.³, Гнєдаш Г.О.⁴, Мартюк О.В.⁵

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна

¹член-кореспондент НАН України, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net

²канд. техн. наук, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

³канд. техн. наук ст. наук. співр., orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁴канд. техн. наук, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0003-0395-9615, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

⁵мол. наук. співр., e-mail: martiuko76@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.10>

Наведено результати досліджень щодо створення вискоефективного утилізатора скидної теплоти димових газів установок спалювання побутових відходів та штучних палив з них. Обґрунтовано нове технічне рішення повітрогрійного теплоутилізатора з можливістю очищення робочих поверхонь від відкладень пилу. Встановлено закономірності зміни основних показників теплоутилізатора в різних режимах його експлуатації протягом року в практичному діапазоні зміни вхідних параметрів теплоносії.

The research results on the creation of a highly efficient 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 justified. 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 its 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;

α – коефіцієнт надлишку повітря;

Індекси:

вих – на виході;

вх – на вході;

г, с.г. – гази, сухі гази;

нс – навколишнє середовище;

п – повітря;

ут – утилізатор.

Скорочення:

ТПВ – тверді побутові відходи;

УСП – установки спалювання палива.

Вступ. Спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) та штучних палив з них є одним із способів запобігання їхнім екологічним загрозам [1, 2]. Цей спосіб охоплює сукупність технологій, в яких реалізується безпосередньо спалювання побутових відходів, або штучних палив на їхній основі, з використанням утвореної теплоти для вироблення електричної і теплової енергії. Вказані технології є досить різноманітними і мають широке застосування в розвинених країнах світу [3, 4]. При виборі вказаних технологій необхідно враховувати багато факторів технічного і вартісного характеру стосовно умов їх застосування. Важливими завданнями створення відповідних технологічних установок є забезпечення

ефективного спалювання палива і глибока рекуперація утвореної теплоти. Глибина рекуперації пов'язана зі зменшенням обсягів скидного тепла шляхом утилізації теплоти відпрацьованих димових газів.

Утилізація теплоти димових газів в таких технологічних установках є досить складним завданням через вміст у продуктах згоряння цих установок хімічно агресивних сполук у газоподібному стані, а також твердого виносу різного хімічного та фракційного складу у вигляді пилу. Тому одним із основних завдань при створенні і експлуатації систем рекуперації скидної теплоти 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 науково-технічне обґрунтування технічного рішення теплоутилізатора димових газів установок спалювання палив (УСП) з ТПВ та визначення показників його теплової ефективності.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

- на основі досвіду використання сучасних технологій спалювання ТПВ та штучних палив типу RDF (Refused Derived Fuel) та SRF (Solid Recovered Fuels), вилучених з ТПВ, встановити основні складові димових газів;
- визначити вимоги та вихідні дані для створення теплоутилізатора для УСП та розробити його технічне рішення;
- встановити закономірності зміни основних теплових показників теплоутилізатора в різних режимах експлуатації УСП з ТПВ.

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 промисловими 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 аеродинаміки у водогрійних теплообмінних апаратах систем утилізації теплоти промислових скловарних печей різного типу [6, 7].

Результати. На основі аналізу досвіду експлуатації установок спалювання побутових відходів та палив з них 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 є зазвичай не меншою за 200 мг на 1м³ сухих димових газів у разі використання штучних палив з ТПВ та може досягати 50г на 1м³

при спалюванні власне самих ТПВ [8]. Тому основними вимогами до створення теплоутилізаційного устаткування УСП 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 використання в УСП. Теплоутилізатор призначений для нагрівання повітря на горіння УСП шляхом рекуперації теплоти відпрацьованих димових газів, що відходять після турбіни, або водогрійного котла. Рис. 1 ілюструє схематичне зображення цього устаткування та 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 рази за умов помірного, порівняно з іншими методами інтенсифікації теплообміну, зростання аеродинамічного опору. Рух теплоносіїв перехреснотоківий 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 люки.

Досвід експлуатації за промисловими 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 УСП на основі сміття. Дослідження виконувались в різних режимах експлуатації теплоутилізатора протягом року, а саме: за різних вхідних температур димових газів і повітря з навколишнього середовища, вологості димових газів, коефіцієнта надлишку повітря, рівня запиленості

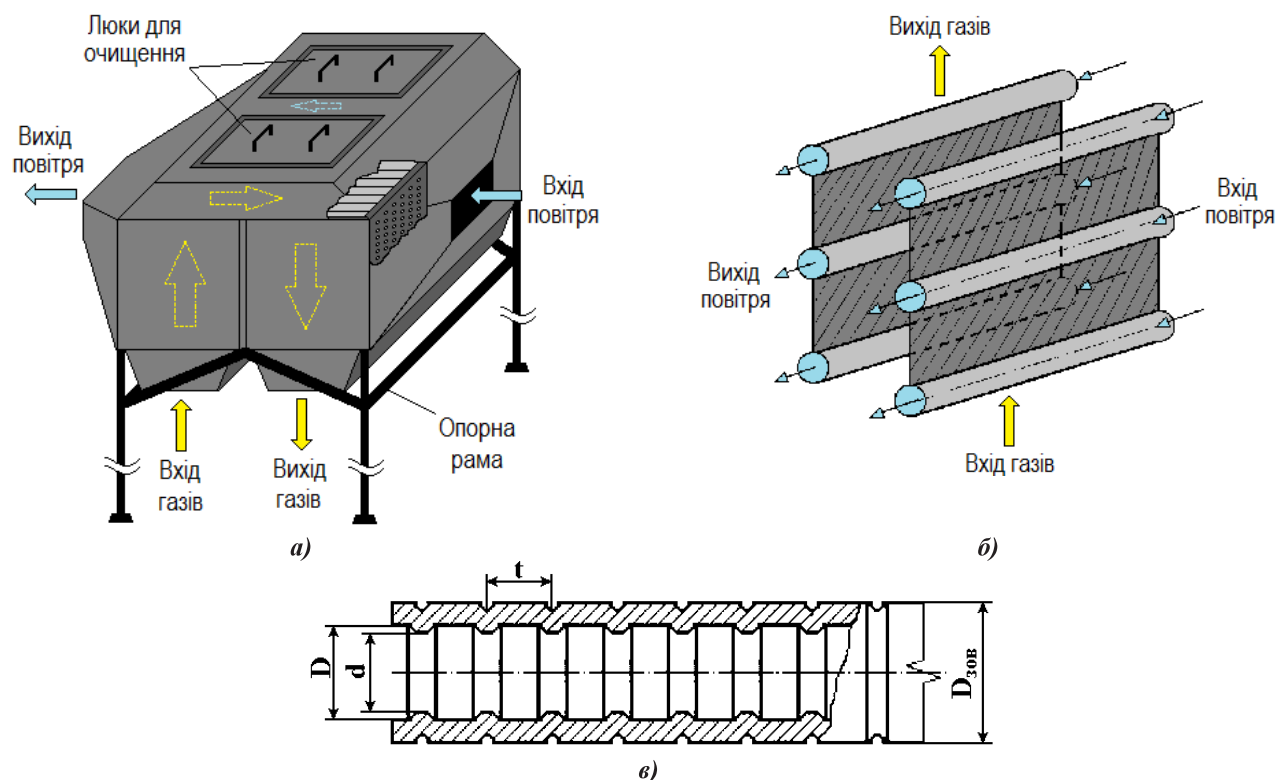


Рис. 1. Схематичне зображення повітрогрійного теплоутилізатора для УСП та його теплообмінної поверхні: а – загальний вигляд; б – теплообмінна поверхня з напрямком руху теплоносіїв; в – труба з кільцевими турбулізаторами потоку

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

Результати визначення основних теплових характеристик теплоутилізатора за відсутності шару пилових відкладень на його теплообмінній поверхні наведено на рис. 2 та 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 $107 \div 152^\circ\text{C}$ та нагрівання повітря – до $131 \div 151^\circ\text{C}$ для початкової температури газів $t_{\text{вх}}^e = 200^\circ\text{C}$.

У разі підвищення за тих же умов температури твх до 300°C досягається вищий рівень підігрівання

повітря (до температури $198 \div 220^\circ\text{C}$), але реалізується і збільшення вихідної температури димових газів в межах $168 \div 227^\circ\text{C}$.

Слід зазначити, що зменшення витрати повітря відповідно зі зміною його коефіцієнта надлишку α з 1,5 до 2,5 відповідає підвищенню рівня кінцевої температури повітря: на $9 \div 11^\circ\text{C}$ для $t_{\text{вх}}^e = 200^\circ\text{C}$ та на $13 \div 15^\circ\text{C}$ для $t_{\text{вх}}^e = 300^\circ\text{C}$. Вказані рівні підвищення температури повітря отримані з урахуванням того, що зі зменшенням витрати 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 α 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 $95 \div 274$ кВт. Причому величина $Q_{\text{ут}}$ зростає з підвищенням початкової температури димових газів

Таблиця 1. Вихідні дані

Найменування характеристики, розмірність	Значення
Витрата димових газів, кг/с	1,8
Коефіцієнт надлишку повітря	1,5 ÷ 2,5
Температура димових газів на вході, °C	200 ÷ 300
Температура повітря на вході, °C	-20 ÷ +20
Вологовміст димових газів на вході, кг/кг с.г.	0,15 ÷ 0,20
Коефіцієнт запиленості теплообмінної поверхні	0,5 ÷ 1,0

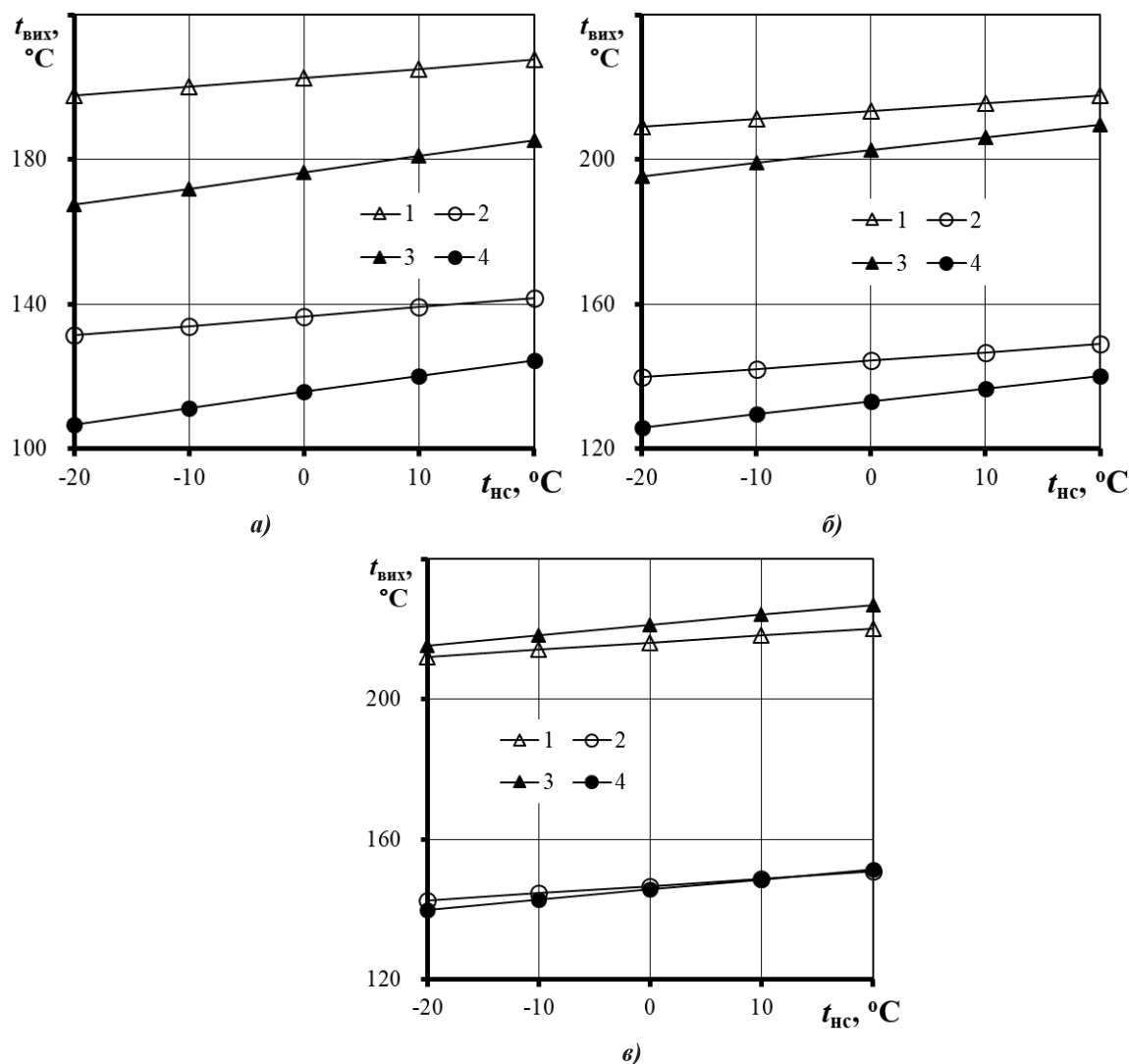


Рис.2. Залежність температур нагрітого повітря $t_{\text{вх}}^n$ (1, 2) та охолоджених димових газів $t_{\text{нх}}^n$ (3, 4) від температури навколишнього середовища $t_{\text{ср}}$ за різних температур димових газів на вході $t_{\text{вх}}^{\text{вх}}$ та коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,5$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

та витрати повітря і зменшується з підвищенням його температури $t_{\text{ср}}$.

За результатами досліджень також встановлено, що за розглянутих умов зміна початкового вологовмісту ди-

мових газів не впливає на їхній кінцевий вологовміст. Тобто в процесі теплоутилізації не реалізується глибоке охолодження цих газів, що забезпечує під час 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 коефіцієнта теплопередачі 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 95 °С. За цих умов підвищується кінцева температура димових газів в 1,1 ÷ 1,2 рази до максимального значення 245 °С, 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 $Q_{\text{ут}}$ 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 $Q_{\text{ут}}$ 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 менший коефіцієнт надлишку повітря. Розрахунки показали, що у разі $\alpha = 2,5$ мінімальна величина $Q_{\text{ут}}$ в процесі експлуатації теплоутилізатора знижується до 72 кВт. Для підвищення теплопродуктивності $Q_{\text{ут}}$ 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. Виконано науково-технічне обґрунтування нового технічного рішення повітрогрійного теплоутилізатора для установок спалювання побутових відходів та штучних палив з них, яке характеризується високою тепловою ефективністю, стійкістю робочих поверхонь до корозії та можливістю примусового очищення цих поверхонь від відкладень пилу.

2. Виконано дослідження та визначено основні показники теплової ефективності запропонованого теплоутилізатора в залежності від початкових температур димових газів та повітря, коефіцієнта його надлишку в газах та рівня запиленості робочої поверхні. Показано, що застосування теплоутилізатора протягом року забезпечує:

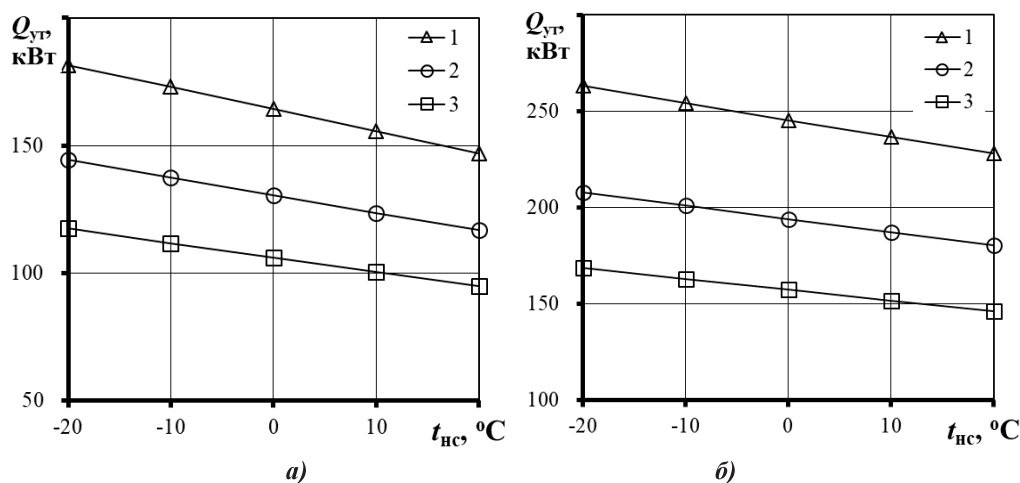


Рис. 3. Залежність теплопродуктивності теплоутилізатора від температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ за різних коефіцієнтів надлишку повітря та температури вхідних газів на вході:

а) $t_{\text{вх}} = 200$ °С, б) $t_{\text{вх}} = 300$ °С; 1 – $\alpha = 1,5$; 2 – $\alpha = 2,0$; 3 – $\alpha = 2,5$

- теплопродуктивність $72 \div 274$ кВт;
- охолодження димових газів до температури $107 \div 245$ °С;
- нагрівання повітря до $96 \div 220$ °С.

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

4. Показано, що 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. *Мазепа 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/tpe.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.¹, Navrodska R.O.², Shevchuk S.I.³,
Gnedash G.O.⁴, Martiuk O.V.⁵

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

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

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

⁴PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, Senior Researcher, orcid.org/0000-0003-0395-9615, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net

⁵Junior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: martiuko76@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.10>

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 a 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 termichnoho 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 zastosuvannya 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 teplooty 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 23.02.2024

Received 23.02.2024

Прийнято до друку 11.04.2024
Accepted for publication 11.04.2024