

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАЛИВОСПОЖИВАЛЬНИХ УСТАНОВОК ІЗ ЗАПИЛЕНИМИ ДИМОВИМИ ГАЗАМИ

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

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

С. І. Шевчук, кандидат технічних наук

Г. О. Гнедаш, кандидат технічних наук

Г. О. Сбродова, кандидат фізико-математичних наук, доцент

Інститут технічної теплофізики НАН України

E-mail: nmfialko@ukr.net

Анотація. *Наведено результати комплексу теплових розрахунків повітрогрійного утилізатора теплоти запилених димових газів установок термічного знешкодження побутових відходів. Вихідні дані для розрахунків приймалися в практичному діапазоні при спалюванні 1т/год побутових відходів з досвіду використання вказаних установок. Теплоутилізатор призначений для нагрівання повітря на горіння шляхом рекуперації теплоти відпрацьованих димових газів, що відходять після турбіни цієї установки. Його конструкційне рішення характеризується можливістю очищення робочих поверхонь від відкладень технологічного пилу. Досліджувались теплові показники (температури теплоносіїв та теплопродуктивність) запропонованого теплоутилізатора за умов його використання для сміттєспалювальних установок. Розрахунки виконувались в різних режимах експлуатації теплоутилізатора протягом року, а саме: за вхідних температур повітря і димових газів в діапазоні від -20 до +20 °С та від 200 до 300 °С відповідно, коефіцієнта надлишку повітря в димових газах від 1,5 до 2,5 та різного рівня запиленості поверхні нагрівання. Вплив запиленості на теплові показники характеризувалась коефіцієнтом k , що визначав рівень зменшення теплопродуктивності теплоутилізатора в результаті відкладень пилу на вказаній поверхні і змінювався в діапазоні від 1 до 0,5. Встановлено, що за розглянутих умов використання запропонованого повітрянагрівача забезпечує його теплопродуктивність $72 \div 263$ кВт, охолодження димових газів до температури $107 \div 245$ °С і нагрівання повітря до $96 \div 220$ °С. За таких рівнів охолодження димових газів ефективність сміттєспалювальної установки підвищується на $2 \div 5$ %. У разі зниження теплопродуктивності теплоутилізатора до недопустимих за технологією рівнів, необхідно здійснювати його примусове очищення стисненим повітрям, як це передбачено технічним рішенням такого повітрянагрівача.*

Ключові слова: *сміттєспалювальні установки, димові гази, запиленість, повітрогрійні теплоутилізатори*

Актуальність. Ефективним способом підвищення енергетичної ефективності паливоспоживальних теплових установок різного призначення є корисне використання скидної теплоти димових газів. Застосування теплоутилізаційних технологій для низки теплових установок (скловарних і металургійних печей, установок термічного знешкодження побутових відходів тощо), що характеризуються запиленістю та агресивністю димових газів, є досить складним завданням. Для вказаних теплових установок наявні розробки водогрійного теплоутилізаційного устаткування вітчизняного та зарубіжного виробництва [1, 2]. Це устаткування зазвичай призначене для генерування теплоенергії у вигляді гарячої води, яка використовується для потреб систем тепlopостачання. Однак, через сезонність використання цієї теплоенергії, енергетична ефективність вказаних установок є значно зниженою в неопалювальний період.

Останнім часом, через високу вартість палива та завдяки розвитку технологій виробництва компактних поверхонь нагрівання, знаходять застосування різні розробки повітрогрійного теплоутилізаційного устаткування. Однією з причин обмеженості їхнього застосування є недостатність інформації щодо їхньої ефективності.

Актуальність даної роботи полягає у вивченні та аналізі теплової ефективності повітрогрійних утилізаторів скидної теплоти запиленних димових газів, яке може застосовуватись для промислових печей різного призначення, установок термічного знешкодження побутових відходів тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженням щодо застосування технологій утилізації теплоти запиленних димових газів з використанням повітрогрійного устаткування (теплоутилізаторів) присвячена певна кількість наукових праць. Це повітропідігрівачі на основі термосифонів [3], поверхневі теплообмінники-рекуператори, які виготовляються з керамічних або металевих матеріалів в залежності від їхнього застосування [4], стаціонарні регенеративні теплообмінники з використанням сучасних акумуляційних матеріалів високої теплоємності [5], обертові регенератори, які працюють аналогічно стаціонарним апаратам за умов передавання тепла через пористе теплове колесо між гарячими і

холодними тепловими потоками [6] тощо. Вказані теплообмінники-теплоутилізатори є складними у виконанні та дороговартісними.

Існують також вітчизняні розробки поверхневих компактних повітрогрійних теплоутилізаторів панельного типу для скловарних печей [1], які можуть бути застосовані і для інших паливоспоживальних установок.

Мета дослідження – визначення показників теплової ефективності повітрогрійних теплоутилізаторів панельного типу для установок термічного знешкодження побутових відходів.

Для досягнення мети були поставлені *основні завдання дослідження*:

- визначити вихідні дані для розрахунку теплоутилізатора сміттєспалювальної установки (ССУ) на 1 т/год побутових відходів;
- виконати тепловий розрахунок теплоутилізатора обраної ССУ;
- встановити закономірності зміни основних теплових показників теплоутилізатора в різних режимах експлуатації ССУ.

Матеріали та методи дослідження. Для визначення основних характеристик теплоутилізаційних систем використовувалися відомі методи теплового розрахунку поверхневих теплообмінних апаратів.

Результати досліджень та їх обговорення. Для використання скидної теплоти димових газів ССУ запропоновано теплоутилізатор панельного типу (рис. 1). Теплоутилізатор призначений для нагрівання повітря на горіння шляхом рекуперації теплоти відпрацьованих димових газів, що відходять після турбіни цієї установки. За результатами виконаного аналізу літературних джерел [7, 8] температура димових газів після турбіни коливається в межах $200 \div 300$ °С, витрата димових газів на 1т/год спалюваного сміття становить в середньому $5000 \text{ м}^3/\text{год}$. Вологовміст димових газів здебільшого відповідає $0,15 \div 0,20$ кг/кг с.г., а коефіцієнт надлишку повітря в димових газах зазвичай становить $1,5 \div 2,5$. Запиленість димових газів змінюється в досить широких межах від 0,2 до 50,0 г/кг с.г. [8].

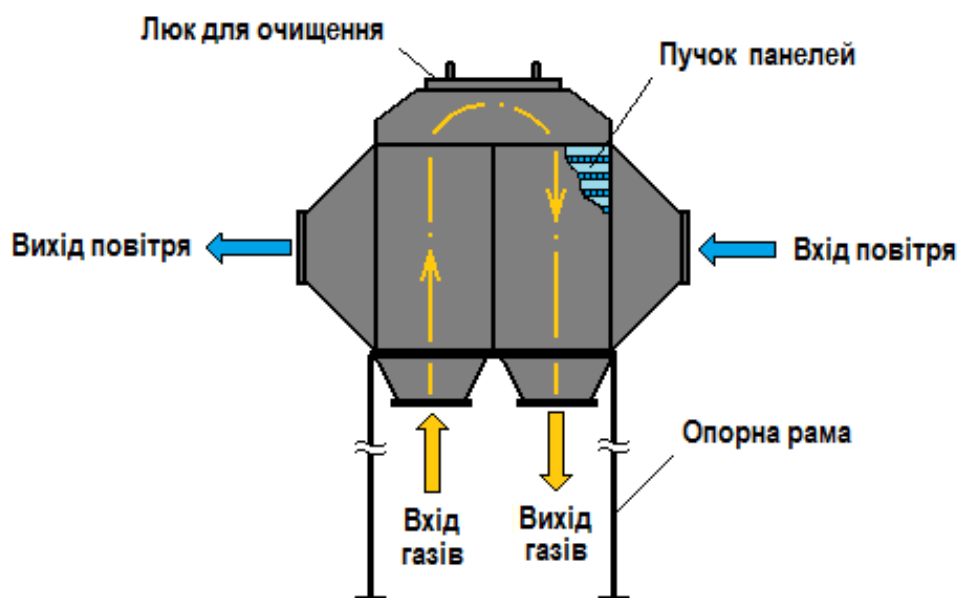


Рис. 1. Схема повітрогрійного теплоутилізатора, призначеного для підігрівання повітря на горіння

Теплообмінною поверхнею теплоутилізатора слугує пакет панелей, утворених трубами з мембранами (рис. 1). Застосовувані труби мають інтенсифікатори теплообміну на їхніх поверхнях. Рух теплоносіїв перехреснотоківий з проходженням димових газів у міжтрубному просторі, а повітря в трубах, де забезпечується інтенсифікація теплообміну в $1,6 \div 1,8$ разів. Конфігурація панелей сприяє зменшенню відкладень пилу в процесі експлуатації теплоутилізатора. Його конструкційне рішення дозволяє виконувати додаткове очищення цих поверхонь стисненим повітрям через спеціальні люки.

Визначено основні теплові показники (температури теплоносіїв та теплопродуктивність) запропонованого теплоутилізатора за умов його використання для сміттєспалювальних установок. Розрахунки виконувались в різних режимах експлуатації теплоутилізатора протягом року, а саме: за вхідних температур повітря і димових газів в діапазоні від -20 до $+20$ °С та від 200 до 300 °С відповідно, коефіцієнта надлишку повітря в димових газах від $1,5$ до $2,5$ та різного рівня запиленості поверхні нагрівання. Вказаний рівень характеризувався коефіцієнтом k , що визначав відносне зменшення теплопродуктивності теплоутилізатора в результаті відкладень пилу на вказаній поверхні і змінювався в діапазоні від 1 до $0,5$. Максимальне досліджуване зниження теплопродуктивності відповідає

коефіцієнту $k = 0,5$, тобто зменшенню теплопродуктивності теплоутилізатора вдвічі. За такого зниження рекомендується виконувати примусове очищення теплоутилізатора. У разі потреби очищення можна виконувати і при менших рівнях запиленості поверхні нагрівання.

Результати визначення основних досліджуваних параметрів теплоутилізатора за наявності забруднень на його теплообмінній поверхні наведено на рис. 2 та 3. Дані подано за умови прийнятого в дослідженнях максимального запилення поверхні нагрівання теплоутилізатора.

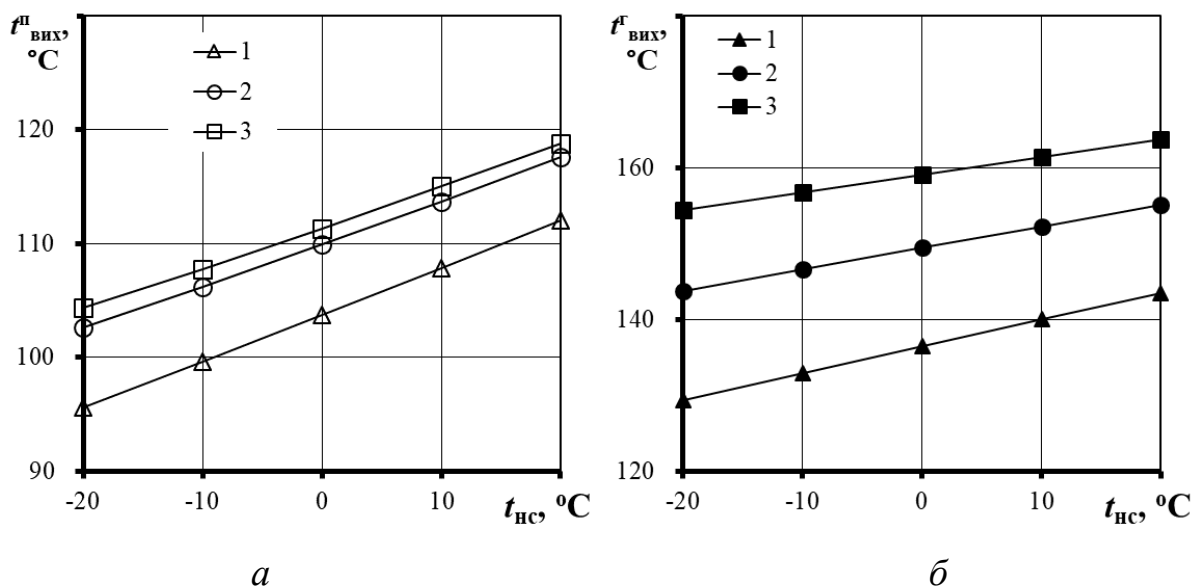


Рис. 2. Залежність для забрудненої поверхні нагрівання температур повітря $t_{вих}^п$ (а) та димових газів $t_{вих}^г$ (б) на виході з теплоутилізатора від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ при різних коефіцієнтах надлишку повітря α та температурі відхідних газів на вході $t_{вх}^г = 200$ °C:

1 – $\alpha = 1,5$; 2 – $\alpha = 2,0$; 3 – $\alpha = 2,5$

Як видно з наведених результатів, використання пропонованого повітрянагрівача забезпечує за досліджуваних умов охолодження димових газів до температури $129 \div 164$ °C та нагрівання повітря до $96 \div 119$ °C за вхідної температури димових газів $t_{вх}^г = 200$ °C в залежності від коефіцієнта його надлишку в димових газах.

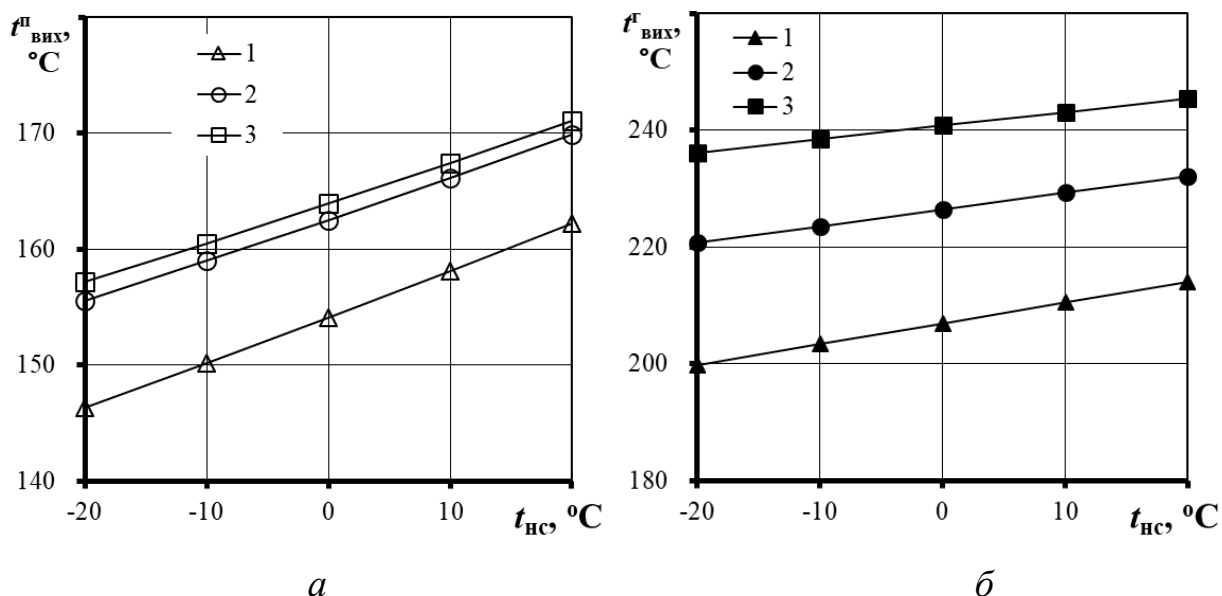


Рис. 3. Залежність для забрудненої поверхні нагрівання температур повітря $t^п_{вих}$ (а) та димових газів $t^г_{вих}$ (б) на виході з теплоутилізатора від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ при різних коефіцієнтах надлишку повітря α та температурі відхідних газів на вході $t^г_{вх} = 300$ °С:

$$1 - \alpha = 1,5; 2 - \alpha = 2,0; 3 - \alpha = 2,5$$

У разі збільшення за тих же умов температури $t^г_{вх}$ до 300 °С забезпечується вищий рівень нагрівання повітря (до 146 ÷ 171 °С) та збільшення вихідної температури димових газів в межах 200 ÷ 245 °С.

Отримані значення вихідної температури димових газів є значно вищими їх температури точки роси, що свідчить про відсутність конденсатоутворення на поверхні теплообмінних панелей.

Результати виконаних розрахунків щодо впливу на досліджувані показники коефіцієнта надлишку повітря α вказує на те, що зі зміною α в межах 1,5 ÷ 2,5 відбувається підвищення рівня кінцевої температури повітря: на 6,8 ÷ 8,8 °С за $t^г_{вх} = 200$ °С та на 8,8 ÷ 10,8 °С за $t^г_{вх} = 300$ °С. На рис. 4 до прикладу наведено дані щодо залежності теплопродуктивності $Q_{ут}$ теплоутилізатора від рівня запыленості теплообмінних поверхонь k за різних вхідних температур теплоносіїв (димових газів та повітря). Ці дані ілюструють закономірності зміни $Q_{ут}$ в інтервалі між очищеннями теплоутилізатора за умов значень коефіцієнта надлишку повітря в димових газах $\alpha = 2,5$ та $\alpha = 1,5$.

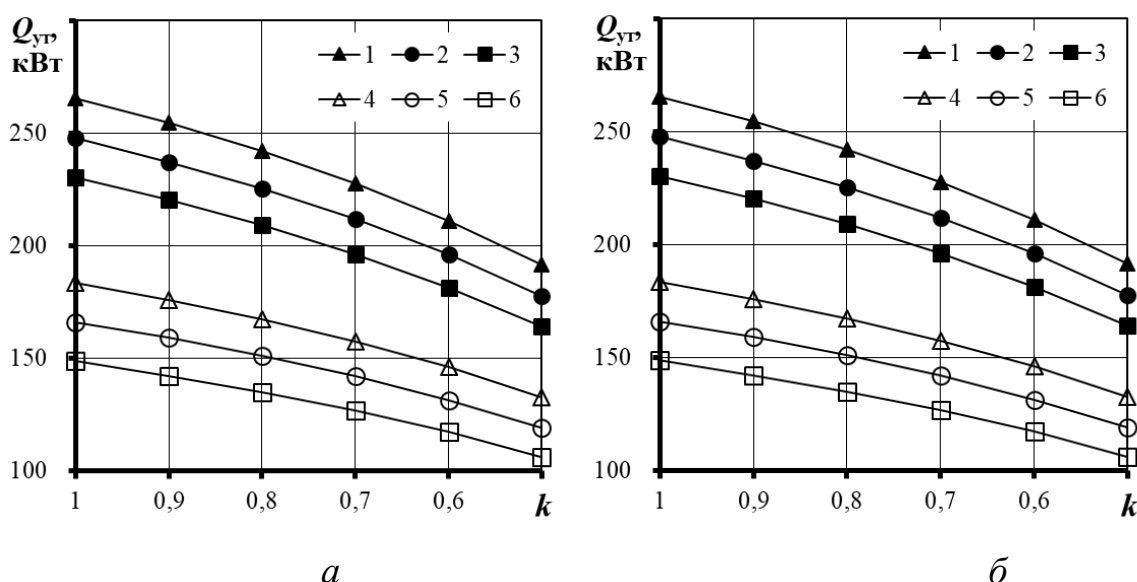


Рис. 4. Залежність теплопродуктивності $Q_{ут}$ теплоутилізатора від коефіцієнта забрудненості k теплообмінної поверхні за різних значень температури відхідних газів і повітря на вході та коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 2,5$ (а) та $\alpha = 1,5$ (б):

$1-3 - t_{вх}^r = 300 \text{ }^\circ\text{C}; 4-6 - t_{вх}^r = 200 \text{ }^\circ\text{C};$

$1, 4 - t_{нс} = -20 \text{ }^\circ\text{C}; 2, 5 - t_{нс} = 0 \text{ }^\circ\text{C}; 3, 6 - t_{нс} = +20 \text{ }^\circ\text{C}.$

Отримані в результаті виконаних досліджень значення теплопродуктивності $Q_{ут}$ запропонованого повітрогрійного теплоутилізатора свідчать, що $Q_{ут}$ за розглянутих умов змінюється в діапазоні $106 \div 266$ кВт і збільшується із зменшенням температури нагріваного повітря, підвищенням температури димових газів і зменшенням запиленості поверхні нагрівання.

У таблиці наведено загальні теплові та аеродинамічні показники запропонованого теплоутилізатора, а також його основні масогабаритні характеристики. Як видно, діапазон зміни теплопродуктивності теплоутилізатора в розглянутих умовах становить $72 \div 263$ кВт. У межах цього діапазону реалізується охолодження димових газів до температури $107 \div 245$ °С та нагрівання повітря – до $96 \div 220$ °С. За розглянутих умов теплова ефективність сміттєспалювальної установки підвищується на 2 - 5 %.

Розрахункові характеристики теплоутилізатора

Найменування характеристики, розмірність	Значення
Теплопродуктивність, кВт	72 ÷ 263
Температура газів на виході, °С	107 ÷ 245
Вологовміст димових газів на виході, °С	120 ÷ 180
Виграта газів, кг/с	1,79
Виграта повітря, кг/с	1,19 ÷ 0,72
Температура повітря на виході, °С	96 ÷ 220
Аеродинамічний опір газового тракту, Па	210 ÷ 320
Аеродинамічний опір повітряного тракту, Па	100 ÷ 270
Габаритні розміри, мм: ДхШхВ	1400x800x1000
Маса, кг	500

Висновки і перспективи.

1. Виконано комплекс розрахункових досліджень щодо встановлення показників теплової ефективності запропонованого повітрогрійного теплоутилізатора димових газів сміттєспалювальних установок (ССУ) в залежності від початкових температур газів та повітря, коефіцієнта надлишку повітря в димових газах і рівня запиленості робочої поверхні. Показано, що застосування теплоутилізатора забезпечує підвищення теплової ефективності сміттєспалювальної установки від 2 до 5 %.

2. Встановлено, що відкладення пилу на теплообмінній поверхні за розглянутих умов призводить до максимального зниження теплопродуктивності теплоутилізатора вдвічі і для підвищення ефективності теплоутилізації необхідно виконувати примусове видалення пилових відкладень стисненим повітрям.

Результати виконаних досліджень будуть використанні для проєктування теплоутилізаційних систем установок термічного знешкодження побутових відходів та інших паливоспоживальних теплових установок, а також в учбових процесах під час підготовки відповідних фахівців.

Список використаних джерел

1. 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>

2. Hussam Jouhara, Navid Khordehghah, Sulaiman Almahmoud, Bertrand Delpech, Amisha Chauhan, Savvas A.Tassou. Waste heat recovery technologies and applications.

Thermal Science and Engineering Progress. 2018. Vol. 6. P. 268-289.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>

3. Yodrak Lerchai, Rittidech Sampan, Nattapol Poomsa-ad, Meena Pattanapol. Waste heat recovery by heat pipe air-preheate to energy thrift from the furnace in a hot forging process. *American Journal of Applied Sciences*. 2010. vol. 7 (5). P.675-681.
<https://thescipub.com/ajas/issue/105>

4. S.D. Knežević, R.M. Karamarkovic, V.M. Karamarkovi, N.P. Stojic, Radiant recuperator modeling and design. *Thermal Science*. 2017. 21 (2). P. 1119-1134.
<https://doi.org/10.2298/TSCI160707232K>

5. Shah R.K., Sekulic D.P. *Fundamentals of Heat Exchanger Design / 1st ed.*, John Wiley & Sons Inc. Hoboken. 2003. 941 p.
https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=beSXNAZbIWQC&oi=fnd&pg=PA1&ots=NZHjqxeaMQ&sig=Br1MipIQ_Ao69cdsL-ej6McCKQc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

6. Punte, S., & Repinski, P. *Thermal Energy Equipment: Waste Heat Recovery. Energy Efficiency Guide for Industry in Waste Heat Recovery. Energy Efficiency Guide for Industry in Asia*. 2006. 18 p.

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

8. 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.

References

1. Fialko, N. M., Prokopov, V. H., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., & Presich, G. O. (2021). Osoblyvosti zastosuvannya 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>

2. Jouhara, H., Khordehgh, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., & Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 268-289. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>

3. Yodrak, L., Rittidech, S., Poomsa-ad, N., & Meena, P. (2010). Waste heat recovery by heat pipe air-preheater to energy thrift from the furnace in a hot forging process. *American Journal of Applied Sciences*, 7(5), 675-681.
<https://thescipub.com/ajas/issue/105>

4. Knežević, S. D., Karamarković, R. M., Karamarković, V. M., & Stojić, N. P. (2017). Radiant recuperator modelling and design. *Thermal Science*, 21(2), 1119-1134.
<https://doi.org/10.2298/TSCI160707232K>

5. Shah, R. K., & Sekulic, D. P. (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons.

https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=beSXNAZbIWQC&oi=fnd&pg=PA1&ots=NZHjqxeaMQ&sig=Br1MipIQ_Ao69cdsL-ej6McCKQc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

6. Punte, S., & Repinski, P. (2006). Thermal energy equipment: waste heat recovery. *Energy efficiency guide for industry in Asia. United Nations Environment Programme, Bangkok.*

7. Johnke, B. (2000). Emissions from waste incineration. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, 455-468.

8. Krot, O. P. (2019). Modelyuvannya ta optymizatsiya protsesiv termichnoho zneshkodzhennya pobutovykh i promyslovykh vidkhodiv u teploheneruyuchykh ustanovkakh [Modeling and optimization of the processes of thermal disposal of household and industrial waste in heat-generating installations]. Kharkiv national university of civil engineering and architecture, 329.

INCREASING THE EFFICIENCY OF FUEL-FIRED PLANTS WITH DUSTY WASTE GASES

N. Fialko, R. Navrodska, S. Shevchuk, G. Gnedash, G. Sbrodova

Abstract. *The results of a set of thermal calculations of the air-heating heat exchanger of the dusty waste gases of the thermal disposal of household waste are given. The initial data for the calculations were taken in the practical range when incinerating 1t/h of household waste from the experience of using the specified installations. The heat-recovery unit is designed to heat air for combustion by recovering the heat of the exhaust gases leaving after the turbine of this installation. Its design solution is characterized by the possibility of cleaning work surfaces from deposits of technological dust. The thermal indicators (temperatures of coolants and heat productivity) of the proposed heat-recovery unit under the conditions of its use for waste incineration plants were investigated. Calculations were performed in different modes of operation of the heat-recovery unit during the year, namely: at inlet temperatures of air and exhaust gases in the range from -20 to +20 °C and from 200 to 300 °C, respectively, the coefficient of excess air in waste gases from 1.5 to 2, 5 and different levels of dust on the heating surface. The influence of dustiness on the thermal parameters was characterized by the coefficient k , which determined the level of reduction in the thermal efficiency of the heat exchanger as a result of dust deposits on the specified surface and varied in the range from 1 to 0.5. Under the considered conditions was established, that use of the proposed air heater it provides heat output of $72 \div 263$ kW, cooling of flue gases to a temperature of $107 \div 245$ °C and heating of air to $96 \div 220$ °C. At such levels of flue gas cooling, the efficiency of the thermal disposal of household waste increases by $2 \div 5\%$. In the case of a decrease in the heat-recovery capacity of the heat-recovery unit to technologically unacceptable levels, it is necessary to carry out its forced cleaning with compressed air, as provided for in the technical solution of such an air heater.*

Key words: *waste incineration plants, waste gases, dustiness, air-heating heat-recovery exchanger*