

УДК 504.06:621.184.5

DOI 10.31548/energiya1(83).2026.004

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНОГО УСТАТКУВАННЯ В ЗАПИЛЕНИХ ГАЗОВИХ ПОТОКАХ**Н. М. Фіалко, док. техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України****Інститут технічної теплофізики НАН С**<https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>E-mail: nmfialko@ukr.net**І. М. Жученко, аспірант****Інститут технічної теплофізики НАН України**<https://orcid.org/0009-0005-7342-284X>E-mail: iz@ramboll.kiev.ua

Анотація. Однією з проблем, що стримують широке впровадження систем рекуперації скидної теплоти на багатьох паливоспоживальних енергетичних і промислових об'єктах, зокрема і на сміттєспалювальних заводах, є запиленість та агресивність димових газів. Підвищення ефективності використання паливних ресурсів на цих об'єктах є вельми актуальним завданням. Мета досліджень – розроблення для сміттєспалювальних агрегатів ефективного теплоутилізаційного устаткування та визначення його основних конструкційних та режимних характеристик. Використовувалися експериментальні та розрахункові методи досліджень. Наведено результати комплексу цих досліджень щодо розроблення ефективного теплоутилізаційного устаткування для запилених газів паливоспоживальних установок. Використовувалися дані експериментальних досліджень стосовно теплообміну при рекуперації скидної теплоти запилених газів скловарних печей за умов застосування різних поверхонь теплообміну. Такими поверхнями слугували пакети сталевих панелей, сконструйованих на основі труб з мембранами, оребрені трубні пучки з чавуну та пучки сталевих труб з кільцевими турбулізаторами потоку. Виконано аналіз теплопродуктивності, коефіцієнта теплопередачі, товщини відкладень пилу пакетів панелей, а також визначено раціональні терміни їх очищення. Результати досліджень свідчать про високу теплову ефективність панельних поверхонь. Розроблено технічне рішення панельного повітрогрійного теплоутилізатора для рекуперації теплоти відхідних газів сміттєспалювальних установок. Теплоутилізатор характеризується значною тепловою ефективністю, стійкістю поверхонь теплообміну до корозійного зношування та можливістю реалізації очищення цих поверхонь від шару пилу. Виконано розрахункові дослідження ефективності запропонованого теплоутилізатора в різних режимах його експлуатації, а саме: за різних вхідних температур димових газів і навколишнього повітря, вологості димових газів, коефіцієнта надлишку повітря, рівня запиленості поверхні теплообміну тощо. Визначено основні режимні характеристики теплоутилізатора в різних режимах експлуатації. Показано, зокрема, що величина його теплопродуктивності за розглянутих умов зменшується в 1,2-1,4 рази при максимальному рівні запиленості теплообмінної поверхні.

Ключові слова: скловарні печі, сміттєспалювальні установки, запилені димові гази, теплоутилізація, ефективність.

Вступ. Широке впровадження систем рекуперації скидної теплоти для паливоспоживальних енергетичних установок промислового та комунального призначення стримується низкою проблем, однією з яких є запиленість скидних газових потоків. До прикладу, значною запиленістю відхідних димових газів характеризуються скловарні агрегати різного призначення, цементні печі, установки спалювання побутового сміття тощо [1-4].

Під час створення та експлуатації вказаних установок важливим є забезпечення ефективного використання палива, зокрема і шляхом корисного використання частини скидної теплоти відхідних димових газів. Складність рекуперації цієї теплоти пов'язана з відкладеннями на робочих поверхнях теплоутилізаційного устаткування твердого виносу різного хімічного та фракційного складу та з виносом у газовій фазі хімічно агресивних сполук. Температура відхідних газів теплових установок, що розглядаються, здебільшого

змінюється від 200 – 400 °С в залежності від типу теплового агрегату. Корисне використання потенціалу скидної теплоти шляхом створення ефективних теплоутилізаційних установок для паливоспоживальних об'єктів з запиленими димовими газами є актуальним завданням.

Огляд літературних джерел. Для рекуперації скидної теплоти, зокрема скловарних печей, застосовується різне за конструктивним виконанням та призначенням теплоутилізаційне устаткування. Для цих установок використовуються і досить давно парові та водогрійні теплоутилізатори [5-7]. Водогрійними теплоутилізаторами слугують теплофікаційні економайзери із чавунних оребрених труб, сталеві економайзери котельних установок, газотрубні теплоутилізатори з використанням труб з інтенсифікаторами теплообміну, а також панельні водогрійні теплоутилізатори ТВМ розробки Інституту теплофізики НАН України [8–13].

Завданням поданої роботи є розроблення ефективного теплоутилізаційного устаткування для установок спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) та штучних палив з них на основі використання накопиченого досвіду щодо створення, дослідження та експлуатації теплоутилізаторів ТВМ.

Мета дослідження полягає у розробленні для сміттєспалювальних агрегатів ефективного теплоутилізаційного устаткування та визначення його основних конструкційних і режимних характеристик.

Матеріали та методи дослідження. Використовувалися експериментальні та розрахункові методи досліджень. Виконання досліджень здійснювалось на експериментальному стенді, спорудженому за скловарною піччю виробництва тарного скла, а також на інших склоробних виробництвах в процесі пуско-налагоджувальних робіт при впровадженні теплоутилізаторів водогрійних модульних ТВМ. на різних склоробних підприємствах. Розрахункові методи базувались на відомих методах теплового розрахунку теплообмінного устаткування та використанні експериментальних даних [14].

Результати досліджень та їх обговорення. Завдання експериментальних досліджень полягали у визначенні середніх значень коефіцієнтів теплопередачі пакетів панелей з мембранними трубами (рис. 1) в умовах їх застосування для рекуперації теплоти скидних газів скловарних печей при різній запиленості газових потоків. Досліджувалась також динаміка забруднення поверхні панелей з газового боку твердим технологічним виносом печей. За інтенсивністю зменшення коефіцієнта теплопередачі пакетів панелей та динамікою зниження теплопродуктивності в процесі експлуатації встановлювався рекомендований термін здійснення примусового очищення робочих поверхонь.

Результати досліджень рис. 2 демонструють залежності коефіцієнта теплопередачі K_p для пакету панелей та пучка оребрених чавунних труб в теплоутилізаторі експериментального стенду, призначеного для досліджень теплообміну в запилених газових потоках печі виробництва тарного скла. Наведені графіки демонструють також (рис. 2а) закономірності зміни з часом експериментальних (графік 1) та розрахункових (графік 2) значень коефіцієнта теплопередачі K_p досліджуваних поверхонь.

Як видно з наведених результатів, за умов незапиленої поверхні теплообміну (на початку роботи експериментального стенду) має місце рівність експериментальних та розрахункових значень K_p . В процесі забруднення панелей спостерігається зменшення експериментальних величин K_p і їх стабілізація протягом 15–18 діб. Цей період може вважатись орієнтовним терміном для періодичного очищення теплоутилізатора, призначеного для використання за печами виробництва тарного скла. Для інших виробництв динаміка зміни коефіцієнта теплопередачі може бути іншою.

Результати зіставлення значень коефіцієнтів теплопередачі в пакеті панелей та в пучку оребрених чавунних труб (рис. 2б) свідчать, що за величиною коефіцієнта теплопередачі панелі з мембранними трубами є ефективнішими ніж вказані трубні пучки.

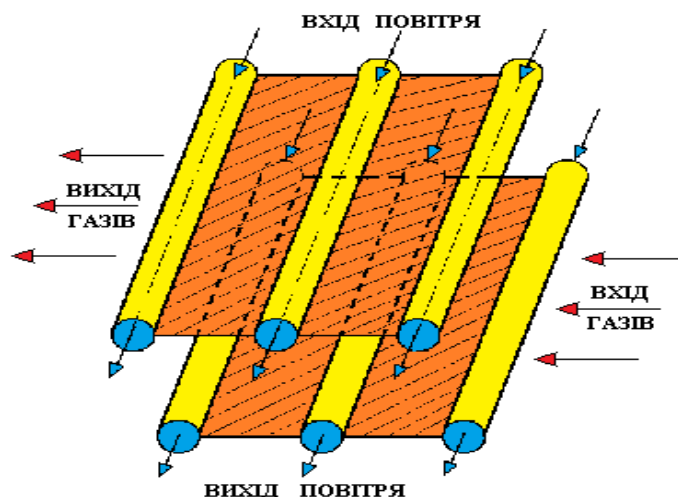


Рис. 1. Пакет панелей, утворених трубами з мембранами

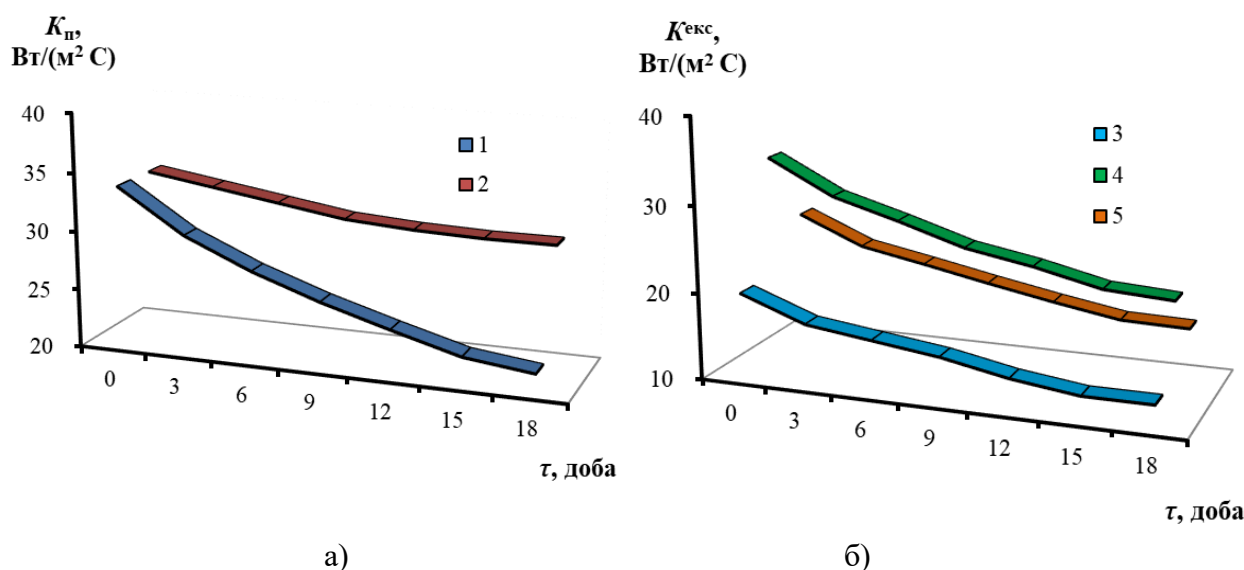


Рис. 2. Динаміка експериментального $K_{п}^{екс}$ (1) та розрахункового значень $K_{п}^{роз}$ (2) коефіцієнтів теплопередачі і пакеті панелей досліджуваного теплоутилізатора (а) та експериментального $K_{п}^{екс}$ в трубній (3), панельній (4) його частинах та загального (5) в експериментальній установці (б)

Для досліджуваних теплообмінних поверхонь розраховувався коефіцієнт забруднення ψ_3 , який визначався за відношенням коефіцієнтів теплопередачі запиленої і чистої поверхні панелей з газового боку. Відповідні дані щодо ψ_3 в умовах запиленості запічних газів $200 - 300 \text{ мг}/\text{м}^3$, характерної для виробництва тарного скла, подано на рис. 3 (графік 1). На цьому ж рисунку наведено значення коефіцієнта запиленості ψ_3 для печей виробництва медичного скла (графік 2), де рівень запиленості димових газів набагато вищий $300 - 1000 \text{ мг}/\text{м}^3$. Графіки 3, 4 відповідають коефіцієнтам запиленості внутрішньої поверхні теплообміну газотрубних теплоутилізаторів печей виробництва кришталю [5] з рівнем запиленості запічних газів $600 - 1000 \text{ мг}/\text{м}^3$.

Результати порівняльного аналізу коефіцієнтів ψ_3 свідчать, що панельні теплоутилізатори з використанням труб з мембранами мають суттєву перевагу над газотрубними теплоутилізаторами за рівнем запиленості робочих поверхонь. При цьому було встановлено, що в панельній частині теплоутилізатора має місце часткове самоочищення поверхні панелей за умов організації режиму проходження газами міжпанельного простору з швидкістю газового потоку не менше $10 \text{ м}/\text{с}$.

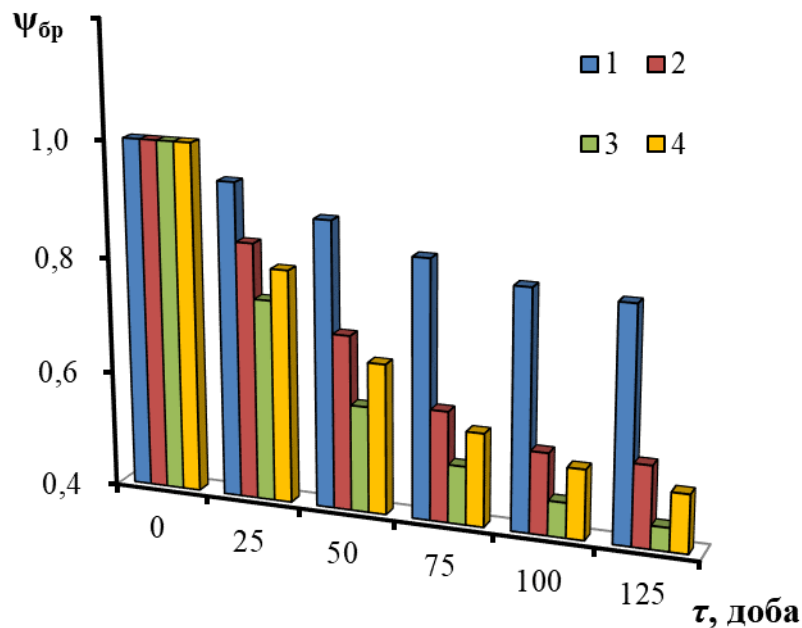


Рис. 3 Динаміка коефіцієнта забруднення ψ_z різних поверхонь теплообміну:
 1 – панелі в теплоутилізаторі експериментальної установки; 2 – панелі в теплоутилізаторі теплоутилізаційної установки печі виробництва медичного скла; 3 – труби з кільцевими турбулізаторами; 4 – гладкі труби

Під час виконання досліджень аналізувалась також динаміка забруднюваності поверхні теплообміну шляхом визначення товщини пилових відкладень у пакеті панелей труб з мембранами теплоутилізатора експериментального стенду. В процесі запилення поверхні панелей ця товщина збільшувалась до значення приблизно 6 мм. При цьому теплопродуктивність теплоутилізатора зменшувалась на 40 – 50 %. Примусове видалення пилу з поверхні панелей стисненим повітрям дозволяє майже повністю відновити початкову теплопродуктивність панельної частини теплоутилізатора [10].

Накопичений досвід щодо створення та експлуатації панельних теплоутилізаторів ТВМ за скловарними печами використовувався при розробленні відповідного устаткування для смітєспалювальних установок. Для рекуперації скидної теплоти запропоновано повітрогрійне устаткування (рис. 4), конфігурація поверхні теплообміну якого відповідає з газового боку конфігурації теплоутилізаторів ТВМ. Ця конфігурація обумовлюється певними розмірами труб і мембран, що сприяє при організації раціональних режимів експлуатації частковому самоочищенню панелей від відкладень пилу.

Для інтенсифікації теплообміну з боку нагріваного повітря, яке проходить всередині труб панелей, ці труби мають кільцеві турбулізатори потоку (рис. 4б), які забезпечують збільшення коефіцієнта тепловіддачі всередині труб в 1,4 – 1,8 разів при відносно невеликому збільшенні аеродинамічного опору з боку повітря. В повітрянагрівачі організовано перехреснотоківий рух теплоносіїв з проходженням повітря в трубах, а газів у між панельній його частині. В теплоутилізаторі передбачено можливість примусово очищення панелей з газового боку стисненим повітрям.

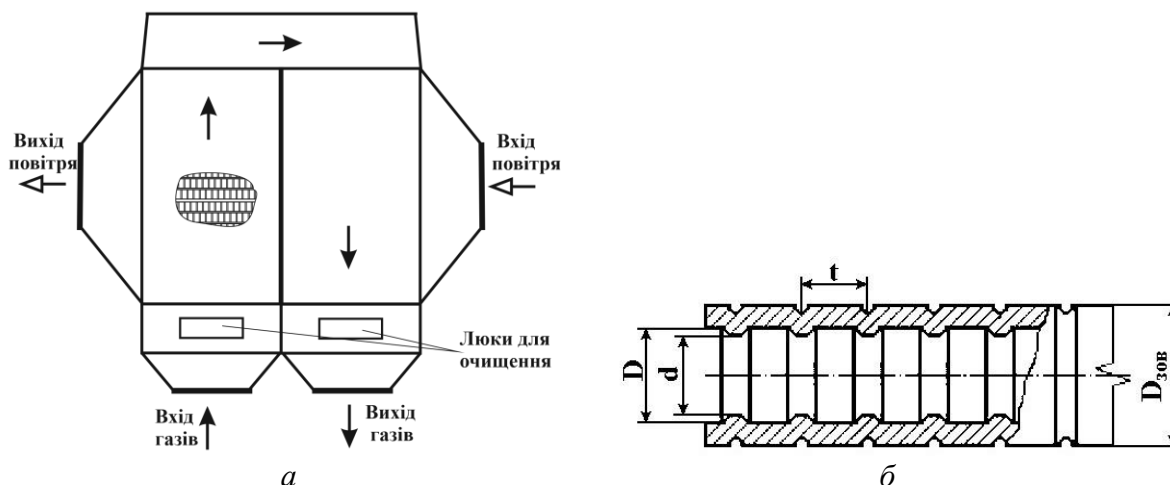


Рис. 4. Схематичне зображення повітрогрійного теплоутилізатора ССУ та його теплообмінної поверхні:

a – загальний вигляд; *б* – труба з кільцевими турбулізаторами потоку

Виконано розрахункові дослідження щодо основних конструкційних та режимних характеристик запропонованого повітрогрійного теплоутилізатора за різних умов його роботи протягом річного періоду використання сміттєспалювальної установки, а саме: за різних вхідних температур димових газів і навколишнього повітря, коефіцієнта його надлишку, вологості димових газів, коефіцієнта надлишку повітря, рівня забрудненості панелей з газового боку тощо. Вихідні параметри для розрахункових досліджень приймалися згідно з літературою [15] в практичному діапазоні використання на одну тону спалювання сміття за годину. Зокрема, витрата димових газів відповідала значенню 1,8 кг/с. Значення вхідних температур скидних газів коливались в межах 200 – 300 °С, а повітря в межах від -20 до +20 °С. Коефіцієнти надлишку повітря приймалися рівним 1,5 та 2,0, а величина коефіцієнта забрудненості теплообмінної поверхні k змінювалось від 0,5 до 1. Значення $k = 0,5$ відповідає зниженню вдвічі коефіцієнта теплопередачі поверхні за інших рівних умов.

Отримані результати засвідчили, що величина кінцевої температури нагріваного повітря за значень $k = 0,5$ зменшується в 1,3 – 1,4 рази і мінімальне її значення становить 96 °С. За цих умов підвищується в 1,1 – 1,2 рази кінцева температура димових газів (за теплоутилізатором) до максимального значення 245 °С, що свідчить про недовикористання їхньої теплоти і необхідність здійснення примусового видалення пилових забруднень з поверхні теплообміну, як це і передбачено технічним рішенням теплоутилізатора.

Величина теплопродуктивності $Q_{ут}$ запропонованого теплоутилізатора зменшується в 1,2 - 1,4 рази за максимального рівня забруднення поверхні теплообміну $k = 0,5$. На рис. 5 до прикладу наведено результати досліджень щодо залежності теплопродуктивності $Q_{ут}$ запропонованого теплоутилізатора від рівня запиленості k поверхні теплообміну за різних значень вхідних температур теплоносіїв (скидних газів та повітря) та при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 2,0$.

Наведені результати 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, а також 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 поверхні теплообміну теплоутилізатора.

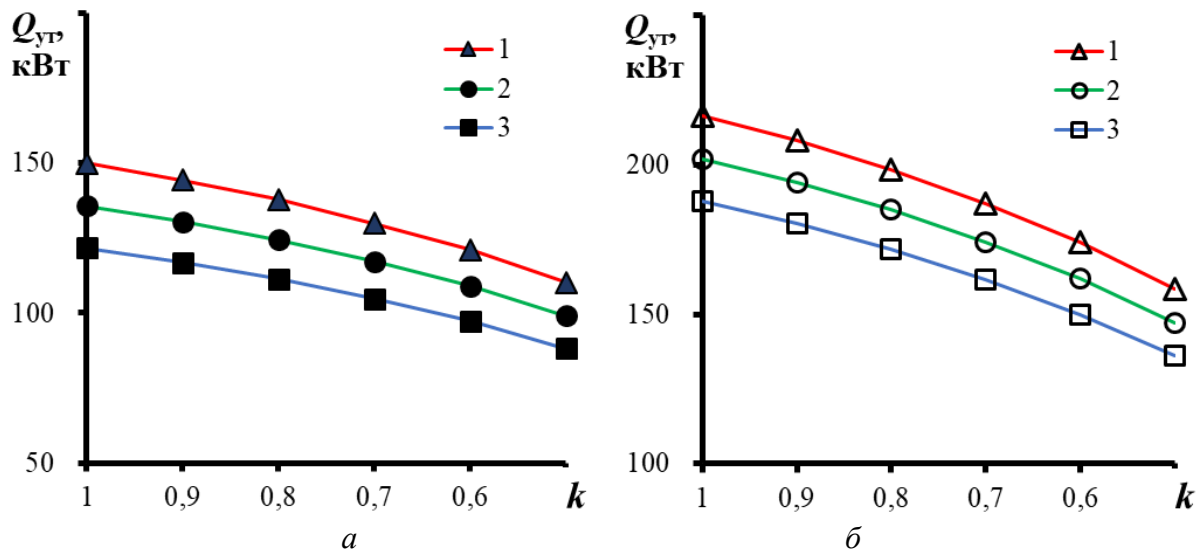


Рис. 5. Залежність теплопродуктивності $Q_{ут}$ теплоутилізатора від коефіцієнта забрудненості k теплообмінної поверхні за різних значень температури газів і повітря на вході та коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 2,0$:

$$a - t_{вх} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad б - t_{вх} = 300 \text{ } ^\circ\text{C};$$

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

Результати досліджень засвідчили також, що за розглянутих умов та зокрема за початкового вологовмісту димових газів в межах 0,15 – 0,20 кг/кг с.г. в запропонованому повітрянагрівачі не відбувається зниження температури цих газів нижче точки роси, що забезпечує в процесі теплоутилізації застосовувані поверхні теплообміну від корозійного руйнування хімічно активними сполуками димових газів, розчинних в утвореному конденсаті.

Висновки. Виконано комплекс експериментальних та розрахункових досліджень щодо розроблення високоефективного теплоутилізаційного устаткування, призначеного для використання в середовищі запиленних скидних газів паливоспоживальних установок. При цьому:

1. Проаналізовано результати експериментальних досліджень щодо теплообміну при рекуперації скидної теплоти запічних газів установок скловарного виробництва за умов використання різних поверхонь теплообміну. Результати засвідчили про перспективність використання в системах рекуперації скидної теплоти поверхонь із пакетів панелей, утворених трубами з мембранами.

2. Розроблено технічне рішення повітрогрійного теплоутилізатора для смітеспалювальних установок, яке характеризується високою тепловою ефективністю, стійкістю робочих поверхонь до корозії та можливістю примусового очищення цих поверхонь від відкладень пилу.

3. Визначено основні конструкційні і режимні характеристики запропонованого теплоутилізатора в залежності від початкових температур димових газів та повітря, коефіцієнта його надлишку в газах та рівня запиленості робочої поверхні.

Результати виконаних досліджень плануються до використання при створенні технологій з підвищення ефективності та надійності установок спалювання твердих побутових відходів та палив на його основі та інших енергетичних установок з запиленими димовими газами.

Отримані наукові результати використовуватимуться також в учбових курсах під час підготовки відповідних фахівців.

Список використаних джерел

1. Abd Alkarem, Y. M. A new review in glass furnaces energy saving field by pairing between recuperative and regenerative systems. *International Journal of Advanced Research and Development*. 2018. № 3. P. 17–20. URL: https://www.researchgate.net/profile/Yasser-Karem/publication/329270897_3-6-17-671/links/5bffd84b299bf1a3c155f545/3-6-17-671.pdf
2. Johnke, B. (2000). Emissions from waste incineration. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, 455-468. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/5_3_Waste_Incineration.pdf
3. Чупа В. М., Карпаш О. М., Яворський А. В., Райтер П. М. Огляд сучасного стану сталих технологій енергетичного використання твердих відходів. *Екологічна безпека та збалансоване використання ресурсів*. 2021. № 1(23), С. 115–123. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-1\(23\)-115-123](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-1(23)-115-123)
4. Кошельник О. В., Морозов О. Є., Кошельник В. М. Перспективні системи багатоступінчастої утилізації теплоти димових газів промислових скловарних печей безперервної дії. *Промышленная теплотехника*. 2010. Т. 32, № 6. С. 91-97. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/22199>
5. Гомон В.И., Ратушняк А.И., Чернецкий В.Т., Хрипун А.Ф. Утилизация теплоты запыленных отходящих газов стекловаренных печей. *Стекло и керамика*. 1989. № 4. С. 3–5.
6. Півненко Ю. О., Редько І. О., Череднік А. Д., Рушак Д. О., Бурда Ю. О. Методи утилізації теплоти і очистки відхідних газів вагранкових печей у процесі виготовлення мінеральної вати. *Науковий вісник будівництва*. 2021. Т. 105, №3, С. 187-195. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-187-195>
7. Каневец Г. Е., Кошельник А. В., Суима С. Д., Алтухова О. В. Повышение эффективности работы пластинчатых теплообменников путем оптимизации конструктивных и режимных параметров: Матер. наук.-техн. конф. Ин-ту энергосбережения та енергоменеджменту Нац. техн. ун-ту України "Київський політехн. ін-т" "Енергетика. Екологія. Людина" (Київ, 24-25 травня 2011р.) Київ, 2011. С. 131-136. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/22181>
8. Фиалко Н. М., Степанова, А. И., Навродская Р. А. Эффективность теплоутилизаторов стекловаренных печей в условиях запыленности поверхностей нагрева. *Енергетика і автоматика*. 2016. № 3. С. 28–35. <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/8323>
9. Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Сарюгло А.Г. Утилизация теплоты отходящих газов стекловаренных печей с использованием мембранных труб: монография. Киев: «София-А». 2016. 214 с. ISBN 978- 966-02-7982-7.
10. Фиалко 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>.
11. Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Сарюгло А.Г., Пресич Г.А., Слюсар М.А. Эффективные теплоутилизационные технологии для стекловаренных печей. *Промышленная теплотехника*. 2010. Т. 32, № 6. С. 84–90. <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/126885>
12. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Сарюгло А.Г., Шевчук С.И. Эффективность теплоутилизаторов различного типа для стекловаренных печей. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2010. № 5. С. 32–39. <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/126885>
13. Фиалко Н. М., Степанова А. И., Навродська Р. О., Шевчук С. І. Порівняльний аналіз ексергетичної ефективності теплоутилізаційних систем різного призначення. *Енергетика та автоматика*. 2020. № 1. С. 38-50. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.01.038>
14. Фиалко Н. М., Прокопов, В. Г., Навродская Р. А., Шевчук С. И., Слюсар А. Ф. Исследование состава дымовых газов стекловаренных печей. *Международный научный журнал "Интернаука"*. 2021. №6. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-6-7297>.
15. 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>).

THE HEAT RECOVERY EQUIPMENT FEATURES OF THE APPLICATION IN DUSTY GAS FLOWS**N. Fialko, I. Zhuchenko**

Abstract. One of the problems hindering the widespread adoption of waste heat recovery systems at many fuel-consuming power and industrial facilities, including waste incineration plants, is the dustiness and aggressiveness of the exhaust gases. Improving fuel efficiency at these facilities is a very actual task. The purpose of the research is to develop efficient heat recovery equipment for waste incineration units and to determine its main structural and operational characteristics. Experimental and computational research methods were used. The results of a complex of these studies on the development of effective heat recovery equipment for dusty gases of fuel-consuming power plants are presented. The experimental research results on heat transfer during waste heat recovery of dusty gases from glass melting furnaces under the conditions of using different heat transfer surfaces were used. These surfaces consisted of steel panel packages constructed from pipes with membranes, finned cast-iron pipes bundles, and steel pipes bundles with annular flow turbulators. An analysis of the thermal efficiency, heat transfer coefficient, and thickness of dust deposits on panel packages was performed, and rational their cleaning intervals were determined. The research results indicate high thermal efficiency of panel surfaces. A technical solution for a panel air-heating heat recovery exchanger for heat recovery of exhaust gases from waste incineration plants has been developed. The heat recovery exchanger is characterized by high thermal efficiency, corrosion-resistant heat exchange surfaces, and the possibility to clean these surfaces of dust layer. Calculation studies of the proposed heat recovery exchanger efficiency in different its operation modes during the year were performed, namely: at different inlet exhaust gases temperatures and ambient, exhaust gas humidity, excess air ratio, dustiness level of the heat exchange surface, etc. The main operating characteristics of the heat recovery exchanger under different operating modes have been determined. In particular, it is shown that, under the conditions considered, its heating capacity value decreases by 1.2-1.4 times at the maximum dustiness level of the heat exchange surface.

Keywords: glass furnaces, waste incinerators, dusty exhaust gases, heat recovery, efficiency

References

1. Abd Alkarem, Y. M. (2018). A new review in glass furnaces energy saving field by pairing between recuperative and regenerative systems. *International Journal of Advanced Research and Development*, 3, 17-20. URL: https://www.researchgate.net/profile/Yasser-Karem/publication/329270897_3-6-17-671/links/5bffd84b299bf1a3c155f545/3-6-17-671.pdf
2. Johnke, B. (2000). Emissions from waste incineration. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, 455-468. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/5_3_Waste_Incineration.pdf
3. V. Chupa, O. Karpash, A. Yavorskyi, & P. Raiter (2021). Ohliad suchasnoho stanu stalykh tekhnologiy enerhetychnoho vykorystannia tverdykh vidkhodiv [Overview of the current state of sustainable technologies for energy utilization of solid waste]. *Ecological Safety & Balanced Use of Resources*, 1 (12), 115-123. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-1\(23\)-115-123](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-1(23)-115-123)
4. Koshelnik, O. V., Morozov, O. E., & Koshelnik, V. M. (2010). Perspektyvni systemy bahatostupinchastoi utylizatsii teploty dymovykh haziv promyslovykh sklovarynykh pechey bezperervnoii dii [Promising systems of multi-stage heat recovery for flue gases of continuous-action industrial glass furnaces]. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/22199>
5. Gomon, V. I., Ratushniak, A. I., Chernetskiy, V. T., & Khripun, A. F. (1989). Utilizatsiia teploty zapylennykh otkhodiaschikh gazov steklovarenykh pechey [Heat recovery of dusty exhaust gases from glass melting furnaces]. *Glass and ceramics*, (4), 3-5.
6. Pivnenko, Yu. O., Redko, I. O., Cherednik, A. D., Ruschak, D. O., & Burda, Yu. O. (2021). Methods of heat recovery and purification of exhaust gases from cupola furnaces in the process of manufacturing mineral wool. *Scientific bulletin of construction*, 105(3), 187-195. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-187-195>
7. Kanevets, H. E., Koshelnik, A. V., Suima, S. D., & Altukhova O. V. (2011). Improving the efficiency of plate heat exchangers by optimizing design and operating parameters. "Energy. Ecology. Human": *Materials of scientific- technical conference* (pp. 131-136). Kyiv: Institute of energy saving and energy management of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/22181>

8. Fialko, N., Stepanova, A., & Navrodskaia, R. (2016). Effektivnost teploutilizatorov steklovarenykh pechey v usloviakh zapylennosti poverkhnostey nagreva [Efficiency heat exchanger glass furnaces in dusty conditions of heating surfaces]. *Energy and Automation*, (3), 28-35. URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/8323>
9. Fialko, N., Navrodskaia, R., Sherenkovsky, Ju., Stepanova, A., & Sarioglo, A. (2016) Utilizatsiya teploty otkhodyashchikh gazov steklovarenykh pechey s ispol'zovaniyem membrannykh trub [Heat recovery of exhaust gases using membrane tubes from glass furnace]. Kyiv: Sophia-A. ISBN 978- 966-02-7982-7
10. Fialko, N. M., Prokopov, V. H., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., & Presich G. O. (2021). 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>.
11. Fialko N. M., Navrodska R. A., Sarioglo A. G., Presich G. A., & Slusar M. A. (2010). Effektivnye teploutilizatsionnye tekhnologii dlia steklovarenykh pechey [Efficient heat recovery technology for glass melting furnaces]. *Industrial heat engineering*, 32(6), 84–90. <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/126885>
12. Fialko N. M., Sherenkovsky, Ju., Stepanova, A.I., Navrodskaia, R.A., Sarioglo A. G., & Shevchuk, S. I. (2010). Effektivnost teploutilizatorov razlichnogo tipa dlia steklovarenykh pechey [The efficiency of heat recovery exchangers of various types for glass furnaces]. *Energy Technologies & Resource Saving*, (5), 32-39. <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/126885>
13. Fialko, N., Stepanova, A., Navrodska R. & Shevchuk, S. (2020). Porivnyalnyy analiz ekserhetychnoi efektyvnosti teploutilizatsiynykh system riznogo pryznachennia [Comparative analysis of exergy efficiency of heat recovery systems of various purpose]. *Energy and Automation*, (1). 38-50. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2020.01.038>
14. Fialko N. M., Prokopov, V. H., Navrodskaia, R.A., Shevchuk, S. I., & Sliusar, A. F. (2021). Research of the composition of exhaust gases of glass-melting furnaces. *International Scientific Journal "Internauka"*, (6 (1)), 49-53. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-6-7297>.
15. 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>).