

УДК 536.24:621.184.5

ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТІВ УСТАНОВОК СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

Фіалко Н.М.¹, Навродська Р.О.², Жученко І.М.,³ Шевчук С.І.⁴, Гнєдаш Г.О.⁵¹член-кореспондент НАН України, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net²канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, orcid.org/0000-0001-7476-2962, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net³аспірант, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна, orcid.org/0009-0005-7342-284X, e-mail: ivanzhuchenko@gmail.com⁴канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com⁵канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0003-0395-9615, e-mail: navrodska-ittf@ukr.net<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.1>

Наведено результати досліджень щодо використання трьох методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації для запобігання конденсації в газівідвідних трактах сміттєспалювальної установки з водогрійним котлом. Встановлено закономірності зміни тепловологісних показників в гирлі залізобетонної димової труби в різних режимах котла. Визначено межі результативного застосування кожного з методів для різних умов.

The research results on the use of three methods of heat and humidity treatment of exhaust gases after heat recovery to prevent condensation in the gas exhaust ducts of a waste incineration plant with a water-heating boiler are presented. The regularities of changes in thermal and humidity indicators in the mouth of a reinforced concrete chimney in different boiler modes were established. The limits of effective application of each method for different conditions are determined.

Бібл. 5, табл. 4, рис. 9.

Ключові слова: димові труби, запобігання конденсації, ефективність захисту від корозії. Q – теплопродуктивність, кВт; t – температура, °С; Δt – величина підігрівання, °С; X – вологовміст, г/кг с.г.; χ – частка байпасування; σ – частка підмішуваного повітря; γ – коефіцієнт витрат теплоти на реалізацію методу.

Індекси:

вх – вхід;

вих – вихід;

г – гази;

к – котел;

нс – навколишнє середовище;

п – повітря;

пов – поверхня;

р – роса.

Вступ

Газівідвідні тракти є невід'ємною частиною і відповідальним елементом практично усіх паливоспоживальних енергетичних установок. До надто важливих елементів цих трактів належать димові труби, які служать для створення природної тяги та для відведення вихідних димових газів у верхні шари атмосфери і розсіювання їх до допустимих концентрацій шкідливих викидів, що містяться в цих газах і регламентуються чинними санітарними нормами.

До будівництва і безпечної експлуатації димових труб висуваються високі вимоги. Вони належать до дороговартісних інженерних споруд, що експлуатуються у складних умовах силових навантажень, температурних, вологісно- і хімічноагресивних впливів евакуйованих димових газів та навколишнього середовища [1]. Від експлуатаційної надійності димових труб залежить безперебійна та екологічно безпечна робота промислових та енергетичних об'єктів. Зниження цієї надійності пов'язано з корозійним руйнуванням труб в процесі

роботи. Основними причинами такого руйнування та виникнення аварійних і передаварійних ситуацій на вказаних об'єктах є порушення проєктних температурно-вологісних режимів газовідвідних трактив. Інтенсивність цього руйнування залежить від багатьох факторів, зокрема і від хімічної агресивності газового середовища, що відводиться димовими трубами.

Для зменшення експлуатаційного руйнування відвідних газоходів та димових труб паливоспоживальних установок застосовується ряд заходів [2, 3], результативність яких суттєво залежить від призначення та типу застосовуваної паливоспоживальної установки, конструкційних особливостей газовідвідних каналів, тепловолісних умов їхньої експлуатації, складу димових газів, їх хімічної агресивності тощо.

Сміттєспалювальні установки [4] також належать до енергетичних об'єктів, відповідальними елементами яких є газоходи та димові труби. Зважаючи на знижену температуру відхідних газів цих установок у разі застосування систем глибокої утилізації теплоти, ймовірну велику вологість та високу хімічну агресивність газів, розробка заходів щодо антикорозійного захисту газовідвідних трактив вказаних установок потребує особливої уваги.

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета даного дослідження полягає у аналізі показників тепловолісного стану в гирлі димової труби сміттєспалювальної установки з водогрійним котлом в різних режимах його експлуатації за умов застосування технології глибокого охолодження димових газів і теплових методів запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах.

Для досягнення мети необхідно було вирішити такі завдання дослідження:

- виконати теплові розрахунки сміттєспалювального котла з пропонованою системою утилізації теплоти димових газів та визначити їхні тепловолісні показники на виході з системи;
- встановити закономірності зміни основних тепловолісних показників в гирлі залізобетонної димової труби в різних режимах експлуатації котла.

Методика проведення досліджень

Для утилізації теплоти відхідних газів сміттєспалювального котла застосовувалась комбінована система теплоутилізації. Тепловий розрахунок системи виконувався з використанням відомих методів розрахунку теплообмінного устаткування та результатів досліджень процесів тепло- і масопереносу при глибокому охолодженні димових газів в системах теплоутилізації котельних установок [5].

Для запобігання конденсатоутворенню в гирлі димової труби розглядалося застосування трьох теплових методів тепловолісної обробки димових газів після теплоутилізації. Це методи: підсушування охолоджених в теплоутилізаційній системі димових газів у газопідігрівачі, байпасування частини гарячих газів від котла повз вказану систему та повітряний метод [2].

Розрахунок охолодження вихідних газів в газовідвідних трактах здійснювався за відомими методиками. Необхідною умовою безпечної експлуатації тракту (за відсутності конденсатоутворення) було дотримання в гирлі димової труби умови $t_{\text{пов}} \geq t_p$.

Температура t_p точки роси розраховувалась за формулою

$$t_p = F(X) = 16,129 \ln \frac{X \cdot 10^3}{0,1 \cdot e^{-0,0193X_k} + 3,824}, \quad (1)$$

а температура $t_{\text{пов}}$ поверхні в гирлі димової труби визначалась з рівнянь теплопередачі та теплового балансу стосовно до умов охолодження димових газів у відвідних каналах та димовій трубі.

Результати.

Розрахункові дослідження виконувались для установки з продуктивністю спалювання сміття 5 т/год. Установка призначена для використання теплоти згоряння побутового сміття в котлі, що працює для потреб опалення. Установка оснащена комбінованою системою теплоутилізації відхідних газів, в якій утилізована теплота використовується для попереднього нагрівання повітря на горіння та зворотної тепломережної води котельні. В теплоутилізаційній системі димові гази після котла спершу спрямовуються у теплоутилізатор, в якому підігрівается повітря на горіння, а далі надходять у теплоутилізатор, призначений для підігрівання зворотної тепломережної води перед надходженням її до котла. Температури прямої та зворотної тепломережної води приймалися згідно з параметрами системи опалення з перепадом температур теплоносія 25°C та розрахунковою температурою навколишнього середовища -20°C. У водогрійному теплоутилізаторі в деяких його режимах реалізовувалось глибоке охолодження димових газів (нижче температури точки роси водяної пари, що міститься в газах). Розглядалася димова труба з висотою залізобетонної оболонки 120 м та товщиною стовбура 0,16 м. Розрахункові дані для виконання досліджень наведено в табл. 1.

За результатами виконаних розрахунків застосування вказаних систем теплоутилізації розглянутого котла забезпечує підвищення ефективності використання палива на 5 – 8 %.

В таблиці 2 наведено результати розрахунку температури димових газів після їх охолодження в комбінованій системі теплоутилізації в різних режимах сміттєспалювального котла протягом року. Значення цих температур слугували вихідними даними в дослідженнях ефективності застосування теплових методів запобігання конденсації утворенню в газівідвідних трактах включно до гирла розглянутих димових труб.

Оцінка ефективності розглянутих методів відвернення конденсації утворення у газівідвідному тракті

котельної установки здійснювалась за коефіцієнтом γ , що є відношенням теплової потужності $Q_{\text{вир}}$, необхідної для реалізації методу, до загальної потужності $Q_{\text{т}}$ системи теплоутилізації:

$$\gamma = \frac{Q_{\text{вир}}}{Q_{\text{т}}} \cdot 100, \quad (2)$$

Відносне теплове навантаження сміттєспалювального котла змінювалось в діапазоні 100 – 40 % відповідно до зміни температури навколишнього середовища від -20 до +10 °C.

Розглянемо насамперед ефективність використання для покращення режимів експлуатації газівідвідних трактів включно до гирла димової труби одного з

Табл. 1. Вихідні дані

Table 1. Initial data

Найменування характеристики, розмірність	Значення
Витрата димових газів, кг/с	0,6 – 1,8
Вологовміст димових газів на виході з котла, кг/кг с.г.	0,15 – 0,25
Вологовміст димових газів на вході в димову трубу, кг/кг с.г.	0,95 – 0,25
Температура димових газів після котла, °C	200 – 250
Температура димових газів на вході в димову трубу, °C	52 – 84
Температура зворотної води системи опалення, °C	35 – 70
Температура води після водогрійного теплоутилізатора, °C	37,2 – 72,1
Температура повітря на вході у повітрогрійний теплоутилізатор, °C	-20 – 10
Температура повітря на виході з повітрогрійного теплоутилізатора, °C	137 – 197
Вологовміст нагрітого повітря, кг/кг с.г.	0,01

Табл. 2. Температура димових газів на виході з теплоутилізаційної системи в залежності від температури навколишнього середовища та за різних температур і вологовмісту димових газів за котлом

Table 2. Flue gas temperature at the outlet of the heat recovery system depending on the ambient temperature and at different temperatures and moisture content of the exhaust gases after the boiler

Вологовміст відхідних газів за котлом $X_{\text{вх}}^r$, г/кг с.г.	Температура вихідних газів $t_{\text{вх}}^r$, °C за різних значень температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}^r$, °C та температур димових газів за котлом $t_{\text{вх}}^r$, °C			
	-20	-10	0	10
$t_{\text{вх}}^r = 250$				
250	83,8	71,6	66,4	57,9
200	83,9	71,7	62,9	53,4
150	83,7	73,6	59,4	51,9
$t_{\text{вх}}^r = 200$				
250	77,5	68,4	66,3	59,0
200	77,4	67,1	62,7	54,5
150	77,4	68,4	58,9	52,4

найпоширеніших методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації – методу байпасування. Цей метод полягає в пропусканні частини χ гарячих газів від котла повз теплоутилізаційну систему з наступним їх змішуванням з газами, що охололи у цьому устаткуванні. За цих умов підвищується температура суміші газів на вході у газовідвідний тракт та температура точки роси в режимах глибокого охолодження димових газів в системах теплоутилізації. Умова $t_{\text{пов}} \geq t_p$ у цьому разі може дотримуватися завдяки підвищенню температури суміші газів на вході в димову трубу до такого рівня, що забезпечує перевищення температури поверхні $t_{\text{пов}}$ над точкою роси t_p в гирлі димової труби. На рис. 1 подано принципову схему реалізації вказаного методу у разі застосування пропонованої системи теплоутилізації.

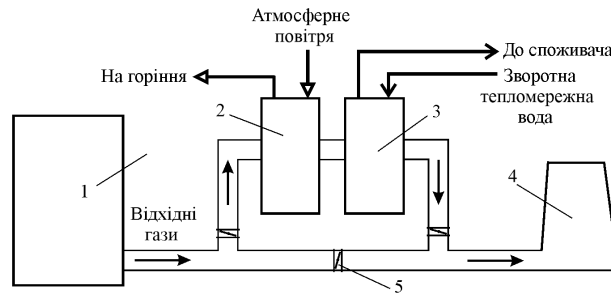


Рис. 1. Реалізація методу байпасування для запобігання конденсатотворенню в газовідвідному тракті установки спалювання палив з ТПВ з комбінованою системою теплоутилізації:

1 – котел; 2 – повітрянагрівач; 3 – водонагрівач; 4 – димова труба; 5 – регулювальний клапан.

Fig. 1. Implementation of the bypass method to prevent condensate formation in the gas exhaust duct of a solid waste incineration plant with a combined heat recovery system: 1 – boiler; 2 – air heater; 3 – water heater; 4 – chimney; 5 – control valve.

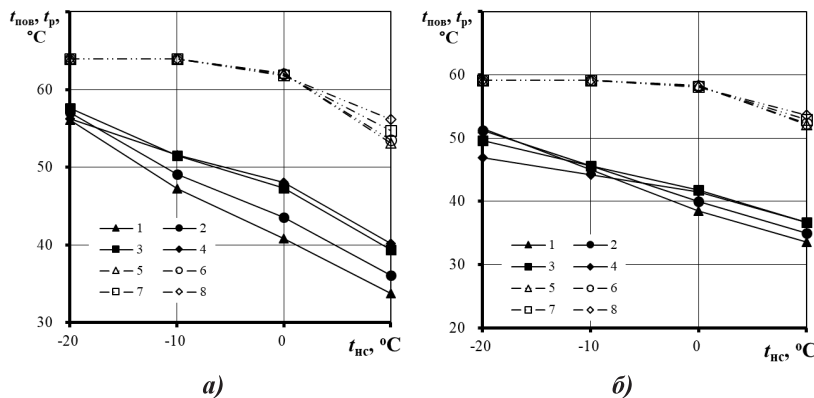


Рис. 2. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{\text{амб}}$ температури внутрішньої поверхні $t_{\text{пов}}$ в гирлі димової труби (1-4) і точки роси t_p (5-8) за різних температур $t_{\text{амб}}$ та вологовмісту $X_{\text{амб}}$ димових газів після котла і за різних часток байпасування χ :

а) $t_{\text{амб}} = 250$ °C, $X_{\text{амб}} = 200$ г/кг с.з.; б) $t_{\text{амб}} = 200$ °C, $X_{\text{амб}} = 150$ г/кг с.з.; 1, 5 – $\chi = 0\%$; 2, 6 – 10% ; 3, 7 – 30% ; 4, 8 – 50%

Fig. 2. Dependence on the ambient temperature $t_{\text{амб}}$ of the temperature of the inner surface t_s of the chimney mouth at different bypassing shares χ :

(1-4) and the dew point t_{dp} (5-8) at different temperatures $t_{\text{амб}}$ and moisture content $X_{\text{амб}}$ of exhaust gases after the boiler and at different bypassing shares χ :

а) $t_{\text{амб}} = 250$ °C, $X_{\text{амб}} = 200$ г/кг с.з.; б) $t_{\text{амб}} = 200$ °C, $X_{\text{амб}} = 150$ г/кг с.з.;

1, 5 – $\chi = 0\%$; 2, 6 – 10% ; 3, 7 – 30% ; 4, 8 – 50%

Характерні результати розрахункових досліджень щодо ефективності використання методу байпасування для відвернення конденсатоутворення у гирлі димової труби за різних температур та вологовмісту газів за котлом при зміні частки байпасування χ в межах 0 – 50 % подано на рис. 2. Рисунок ілюструє закономірності зміни тепловологісних показників (температури поверхні $t_{\text{пов}}$ та точки роси t_p) в гирлі досліджуваної димової труби в різних режимах роботи котла протягом опалювального періоду.

За результатами досліджень метод байпасування за розглянутих умов не дає позитивного результату в усіх розглянутих режимах котла з системою теплоутилізації відхідних газів. Так в гирлі димової труби не дотримується необхідна умова перевищення температури $t_{\text{пов}}$ над точкою роси t_p . Навпаки, t_p є вищою ніж $t_{\text{пов}}$ на 2 – 20 °C в залежності від режиму роботи котла, температури $t_{\text{гвх}}$ та вологовмісту $X_{\text{вх}}$ димових газів на його виході і частки байпасування газів χ . І значення $(t_p - t_{\text{пов}})$ є тим більшим, чим нижче значення температури $t_{\text{гвх}}$ вище $X_{\text{вх}}$, вища температура $t_{\text{нс}}$ навколишнього середовища та більша частка байпасування χ .

Отримані результати є очікуваними, оскільки метод байпасування дуже чутливий до значень вологовмісту газів $X_{\text{вх}}$, бо підмішування байпасованих газів з високим вологовмістом у вихідні гази після теплоутилізаційної системи збільшує вологовміст суміші, а відтак і точку роси цієї суміші.

На рис. 3 наведено результати досліджень щодо відносних витрат теплоти (формула 2) на реалізацію методу байпасування. Як видно, цей метод потребує значних витрат, які досягають за розглянутих χ більше 40% можливого обсягу утилізованої теплоти (за відсутності байпасування). І навіть за таких витрат метод байпасування не забезпечує позитивного результату в плані відвернення випадення конденсату в гирлі залізобетонної труби. За результатами виконаних досліджень можна зробити висновок про низьку ефективність застосування лише одиночного методу для запобігання конденсатоутворенню в розглянутій трубі.

Перейдемо до розгляду ефективності використання методу запобігання конденсатоутворенню у газопідвідних трактах шляхом підігрівання у газопідігрівачі охолоджених в системі теплоутилізації димових газів. Газопідігрівач слугує для збільшення температури газів $t_{\text{вих}}$ на його виході до рівня, що відповідає перевищенню температури $t_{\text{пов}}$ над точкою роси t_p при сталому значенні абсолютної вологості димових газів, а відтак і точки роси. На рис. 4 наведено принципову схему із застосуванням вказаного теплового методу, в якій тепловологісна обробка димових газів реалізується шляхом їх підігрівання на 0 – 30 °C прямою водою котла. Результати досліджень щодо ефективності методу для запобігання конденсатоутворенню в гирлі димової труби наведено на рис. 5.

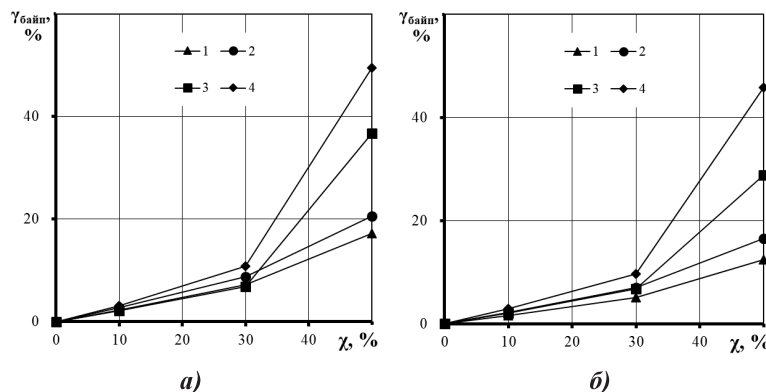


Рис. 3. Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти $\gamma_{\text{байп}}$ на реалізацію теплового методу байпасування газів від частки байпасування χ за різних температур $t_{\text{гвх}}$

та вологовмісту $X_{\text{гвх}}$ димових газів після котла і температур навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$:

a) $t_{\text{гвх}} = 250$ °C; $X_{\text{гвх}} = 200$ г/кг д.г.; б) $t_{\text{гвх}} = 200$ °C; $X_{\text{гвх}} = 150$ г/кг д.г.; 1 – при $t_{\text{нс}} = -20$ °C; 2 – -10 °C; 3 – 0 °C; 4 – 10 °C.

Fig. 3. Dependence of the relative heat consumption coefficient γ_{bayp} for the implementation of the gas bypassing heat method on the bypass share χ at different temperatures $t_{\text{гвх}}$ and moisture content $X_{\text{гвх}}$ of exhaust gases after the boiler and ambient temperatures $t_{\text{нс}}$:

a) $t_{\text{гвх}} = 250$ °C; $X_{\text{гвх}} = 200$ g/kg d.g.; б) $t_{\text{гвх}} = 200$ °C; $X_{\text{гвх}} = 150$ g/kg d.g.; 1 – $t_{\text{нс}} = -20$ °C; 2 – -10 °C; 3 – 0 °C; 4 – 10 °C.

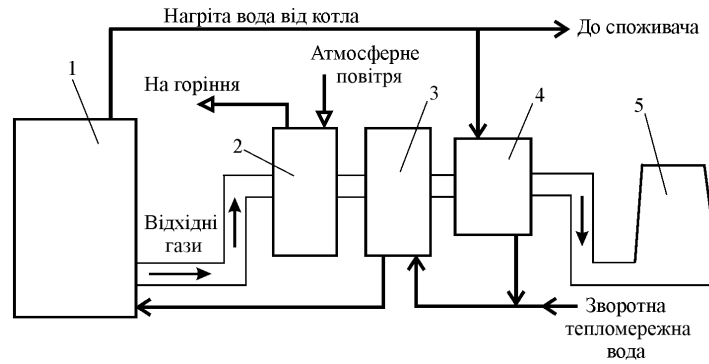


Рис. 4. Реалізація методу підсушування для запобігання конденсації в газівідвідному тракті установки спалювання палив з ТПВ з комбінованою системою теплоутилізації:

1 – котел; 2 – повітрянагрівач; 3 – водонагрівач; 4 – газонагрівач; 5 – димова труба.

Fig. 4. Implementation of the drying method to prevent condensation in the gas exhaust duct of a solid waste incineration plant with a combined heat recovery system:

1 - boiler; 2 - air heater; 3 - water heater; 4 - gas-heater; 5 - chimney.

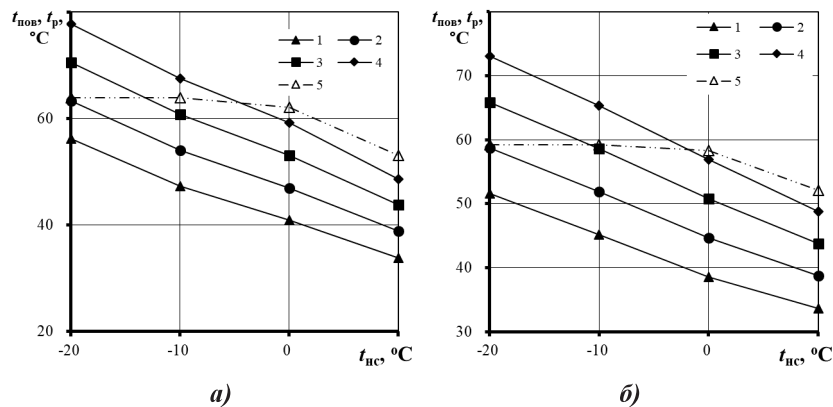


Рис. 5. Залежність від температури навколишнього середовища t_{nc} температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі димової труби (1-4) і точки роси t_p (5) за різних температур димових газів t_{ex} та вологовмісту X_{ex} після котла і величини підігрівання охолоджених газів Δt :

а) $t_{ex} = 250$ °C; $X_{ex} = 200$ г/кг с.г.; б) $t_{ex} = 200$ °C; $X_{ex} = 150$ г/кг с.г.; 1 – $\Delta t = 0$ °C; 2 – 10 °C; 3 – 20 °C; 4 – 30 °C

Fig. 5. Dependence on the ambient temperature t_{amb} of the inner surface temperature t_s of the chimney mouth (1-4) and the dew point t_{dp} (5) at different exhaust gas temperatures t_{in} and moisture content X_{in} after the boiler and the value of heating of the cooled gases Δt :

а) $t_{in} = 250$ °C; $X_{in} = 200$ г/кг с.г.; б) $t_{in} = 200$ °C; $X_{in} = 150$ г/кг с.г.; 1 – $\Delta t = 0$ °C; 2 – 10 °C; 3 – 20 °C; 4 – 30 °C.

Аналіз отриманих результатів досліджуваних тепловолігісних показників (температури поверхні $t_{пов}$ та точки роси t_p) в гирлі залізобетонної димової труби свідчить, що метод підсушування є більш результативним, ніж метод байпасування. За результатами досліджень, в деяких режимах реалізується перевищення температури поверхні $t_{пов}$ над температурою точки роси t_p . І це має місце лише за великих навантажень котла, що відповідають низьким температурам навколишнього

середовища ($t_{nc} < -5$ °C), високим температурам газів на виході з котла ($t_{ex} > 200$ °C) та рівнів підігрівання охолоджених газів у газопідігрівачі Δt , що повинні здебільшого перевищувати 30 °C. При $\Delta t = 20$ °C нормативний режим експлуатації труби може реалізуватись лише в режимах котла, близьких до номінальних.

Щодо рівнів витрат теплоти $\gamma_{підс}$ на реалізацію методу підсушування (рис. 6), то вони є меншими у порівнянні з методом байпасування. Так максимальне значення

коефіцієнта $\gamma_{\text{підс}}$ не перевищує значення 25%. І це значення тим менше, чим менший рівень Δt підігрівання газів, вища температура $t_{\text{вх}}^*$ газів та вологовміст $X_{\text{вх}}$ на вході в теплоутилізаційну систему і нижча температура $t_{\text{нс}}$ навколишнього середовища.

Узагальнюючи результати виконаних досліджень щодо ефективності методу підсушування, можна стверджувати, що за розглянутих умов цей метод не забезпечує запобігання конденсації в димовій трубі у переважній більшості режимів розглянутого котла протягом періоду його експлуатації.

Наступним методом, що сприяє відверненню конденсації в газівідвідному тракті, є повітряний метод (рис. 7). У разі застосування методу відбувається підмішування у гази після теплоутилізації частки σ нагрітого в системі теплоутилізації повітря, що забезпечує зниження точки роси суміші газів і повітря, а також підвищення температури цієї суміші перед надходженням її у димову трубу. Частка σ є відношенням обсягу підмішуваного повітря до обсягу димових газів.

Дотримання умови $t_{\text{пов}} \geq t_p$ у разі застосування даного методу забезпечується і завдяки підвищенню $t_{\text{пов}}$,

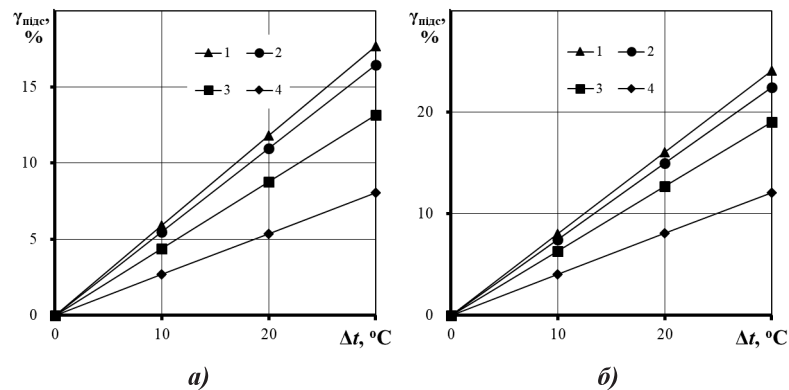


Рис. 6. Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти $\gamma_{\text{підс}}$ на реалізацію теплового методу підсушування відхідних газів від величини підігрівання Δt за різних температур $t_{\text{вх}}^*$ та вологовмісту $X_{\text{вх}}$ димових газів після котла і температур навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$:

а) $t_{\text{вх}}^* = 250$ °C; $X_{\text{вх}} = 200$ г/кг с.з.; б) $t_{\text{вх}}^* = 200$ °C; $X_{\text{вх}} = 150$ г/кг с.з.; 1 – при $t_{\text{нс}} = -20$ °C; 2 – -10 °C; 3 – 0 °C; 4 – 10 °C

Fig. 6. Dependence of the relative heat consumption coefficient γ_{dry} for the implementation of the drying exhaust gases heat method on the value of heating Δt at different temperatures t_{in}^* and the moisture content X_{in} of exhaust gases after the boiler and ambient temperatures t_{amb} :

а) $t_{\text{in}}^* = 250$ °C; $X_{\text{in}} = 200$ g/kg d.g.; б) $t_{\text{in}}^* = 200$ °C; $X_{\text{in}} = 150$ g/kg d.g.; 1 – $t_{\text{amb}} = -20$ °C; 2 – -10 °C; 3 – 0 °C; 4 – 10 °C

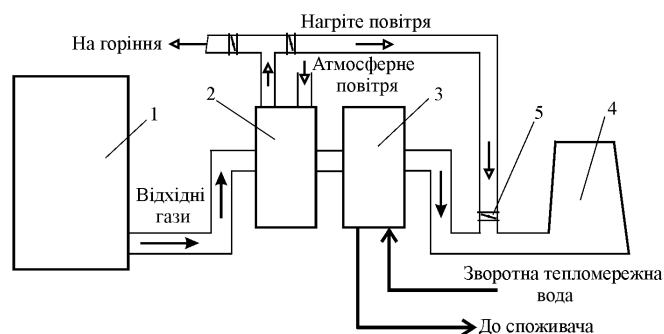


Рис. 7. Реалізація повітряного методу для запобігання конденсації в газівідвідному тракті установки спалювання палив з ТПВ з комбінованою системою теплоутилізації:

1 – котел; 2 – повітрянагрівач; 3 – водопідігрівач; 4 – димова труба; 5 – регулювальний клапан

Fig. 7. Implementation of the air method for preventing condensation in the gas exhaust duct of a solid waste incineration plant with a combined heat recovery system:

1 - boiler; 2 - air heater; 3 - water heater; 4 - chimney; 5 - control valve

що досягається збільшенням температури суміші димових газів при підмішуванні нагрітого повітря, і завдяки зменшенню точки роси t_p шляхом додавання повітря з низькою вологістю ($< 0,01$ кг/кг с.п.). В табл. 3 наведено розрахункові значення температур підмішуваного повітря, нагрітого в повітрянагрівачі теплоутилізаційної системи, в залежності від режиму роботи сміттєспалювального котла.

Результати розрахунків досліджуваних тепловологісних показників в гирлі розглянутої димової труби та відносних витрат теплоти на застосування повітряного методу подано на рис. 8, 9. Аналіз наведених результатів свідчить, що у разі використання цього методу запобігання конденсоутворенню за часток підмішування повітря σ до 30 % реалізується лише в режимах роботи котла, близьких до номінальних, які відповідають низьким

Табл. 3. Температура нагрітого повітря для підмішування у вихідні гази в залежності від температури навколишнього середовища за різних температур димових газів на виході з котла

Table 3. Temperature of heated air for mixing into the exhaust gases depending on the ambient temperature at different exhaust gas temperatures at the boiler outlet

Вологовміст відхідних газів котла $X_{\text{вх}}^r$, г/кг с.г.	Температура нагрітого повітря $t_{\text{вих}}^{\text{п}}$, °C за різних значень температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$, °C та температур димових газів за котлом $t_{\text{вх}}^r$, °C			
	-20	-10	0	10
$t_{\text{вх}}^r = 250$				
250	171,6	178,4	186,4	196,5
200	172,3	178,9	186,9	196,9
150	171,6	178,9	186,9	196,9
$t_{\text{вх}}^r = 200$				
250	137,6	143,7	150,5	159,0
200	137,4	143,4	150,3	158,8
150	137,4	143,4	150,3	158,8

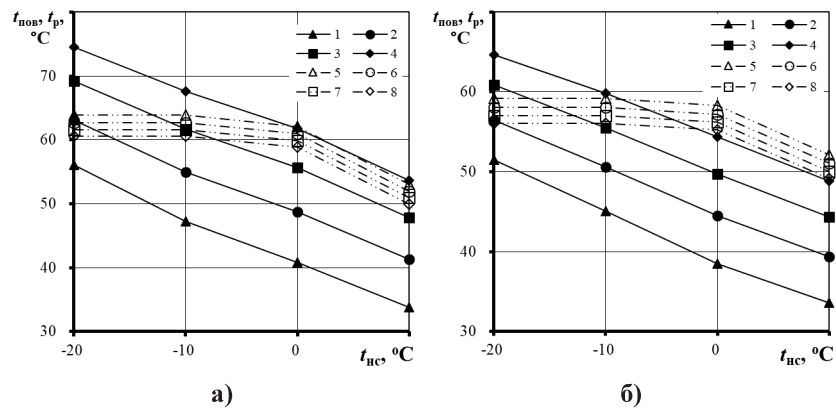


Рис. 8. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ температури внутрішньої поверхні $t_{\text{нов}}$ в гирлі димової труби (1-4) і точки роси t_p (5-8) за різних температур димових газів $t_{\text{вх}}^r$ та вологовмісту $X_{\text{вх}}$ після котла і частки підмішуваного повітря σ :
а) $t_{\text{вх}}^r = 250$ °C; $X_{\text{вх}} = 200$ г/кг с.г.; б) $t_{\text{вх}}^r = 200$ °C; $X_{\text{вх}} = 150$ г/кг с.г.; 1,5 – $\sigma = 0\%$; 2,6 – 10% ; 3,7 – 20% ; 4,8 – 30%
Fig. 8. Dependence on the ambient temperature t_{amb} of the internal surface temperature t_s at the chimney mouth (1-4) and dew point t_p (5-8) at different exhaust gas temperatures $t_{\text{вх}}^r$ and moisture content $X_{\text{вх}}$ after the boiler and the mixing air share σ : а) $t_{\text{вх}}^r = 250$ °C; $X_{\text{вх}} = 200$ g/kg d.g.; б) $t_{\text{вх}}^r = 200$ °C; $X_{\text{вх}} = 150$ g/kg d.g.; 1,5 – $\sigma = 0\%$; 2,6 – 10% ; 3,7 – 20% ; 4,8 – 30%

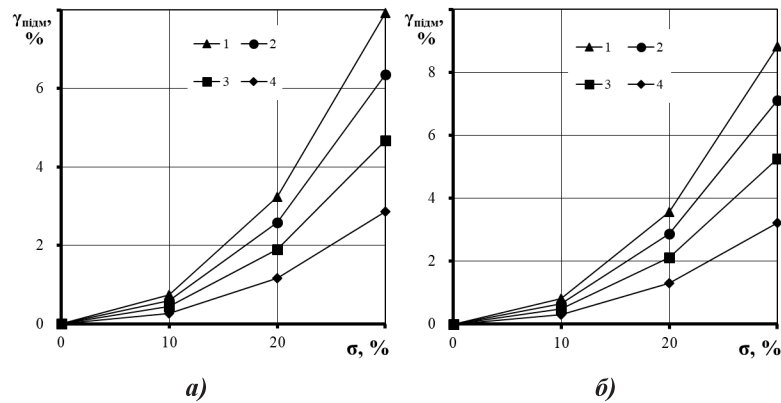


Рис. 9. Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти $\gamma_{\text{підм}}$ на реалізацію повітряного теплового методу від частки підмішуваного повітря σ за різних температур t_{ex}^c та вологовмісту X_{ex}^c димових газів після котла і температур навколишнього середовища t_{nc} :

a) $t_{\text{ex}}^c = 250$ °C; $X_{\text{ex}}^c = 200$ г/кг с.з.; б) $t_{\text{ex}}^c = 200$ °C; $X_{\text{ex}}^c = 150$ г/кг с.з.; 1 – при $t_{\text{nc}} = -20$ °C; 2 – -10 °C; 3 – 0 °C; 4 – 10 °C
Fig. 9. Dependence of the relative heat consumption coefficient γ_{mix} for the implementation of the air heat method on the mixing air share σ at different temperatures t_{in}^c and the moisture content X_{in}^c of exhaust gases after the boiler and ambient temperatures t_{amb} : a) $t_{\text{in}}^c = 250$ °C; $X_{\text{in}}^c = 200$ g/kg d.g.; б) $t_{\text{in}}^c = 200$ °C; $X_{\text{in}}^c = 150$ g/kg d.g.; 1 – $t_{\text{amb}} = -20$ °C; 2 – -10 °C; 3 – 0 °C; 4 – 10 °C

Табл. 4. Витрати теплоти на застосування теплового методу

Table 4. Heat consumption for the application of the thermal method

Застосовувані теплові методи	Максимальне значення коефіцієнта відносних витрат теплоти на реалізацію методу γ , %
Байпасування	більше 40
Підсушування димових газів в теплообміннику-газопідігрівачі	до 25
Повітряний	до 10

температурам навколишнього середовища. Причому, значення σ , необхідне для відвернення конденсатоутворення в гирлі димової труби, тим менші, чим вища температура t_{ex}^c та нижчий вологовміст X_{ex}^c димових газів після котла, нижча температура навколишнього середовища t_{nc} (більше навантаження котла). За результатами досліджень відносні витрати теплоти $\gamma_{\text{підм}}$ на реалізацію цього методу є найменшими у порівнянні з двома іншими методами. Максимальні значення $\gamma_{\text{підм}}$ не перевищують 9 % і відповідають режимам найменших навантажень котла (при $t_{\text{nc}} = +10$ °C) і високим температурам димових газів на вході в теплоутилізаційну систему ($t_{\text{ex}}^c = 200$ °C).

Порівняння ефективності застосування вказаних методів за значеннями коефіцієнта використання теплоти γ наведено в таблиці 4. Отримані результати свідчать про перспективність використання повітряного методу.

Висновки.

1. Виконано розрахункові дослідження щодо ефективності використання для сміттєспалювальних

установок з водогрійним опалювальним котлом комбінованих систем теплоутилізації відхідних газів, призначених для нагрівання дуттьового повітря та зворотної тепломережної води. Встановлено, що:

- застосування систем забезпечує підвищення ефективності використання палива на 5 – 8 %;

- в деяких режимах котла відбувається суттєве зниження температури вихідних газів, що призводить до конденсатоутворення в димовій трубі, яке викликає її корозійне зношування і потребує вживання заходів для антикорозійного захисту цієї труби.

2. Досліджено ефективність використання для антикорозійного захисту газовідвідних трактів котла шляхом запобігання в них конденсатоутворенню трьох методів тепловологісної обробки димових газів після теплоутилізації: методу байпасування частини відхідних газів котла повз теплоутилізаційну систему, підсушування охолоджених газів у газопідігрівачі та підмішування до цих газів частини повітря, нагрітого у вказаній системі.

Показано, що:

- метод байпасування за розглянутих умов не є результативним для запобігання конденсаутворенню в усіх режимах котла, оскільки в гирлі димової труби температура поверхні $t_{\text{пов}}$ є нижчою точки роси t_p . І значення $(t_p - t_{\text{пов}})$ є тим більшим, чим менша температура $t_{\text{вх}}^r$, та більший вологовміст $X_{\text{вх}}^r$ газів за котлом, нижча температура $t_{\text{нс}}$ навколишнього середовища та більша частка байпасування χ ;

- метод підсушування дає позитивні результати для відвернення конденсаутворення в димовій трубі за великих навантажень котла, що відповідають низьким температурам навколишнього середовища ($t_{\text{нс}} < -5^\circ\text{C}$), високим температурам газів на виході з котла ($t_{\text{вх}}^r > 200^\circ\text{C}$) та за рівнів підігрівання Δt охолоджених газів у газопідігрівачі, що перевищують здебільшого 30°C ;

- повітряний метод за розглянутих часток σ (до 30 %) підмішування нагрітого в повітронагрівачі теплоутилізаційної системи повітря забезпечує відвернення конденсаутворення в гирлі димової труби в режимах котла, близьких до номінальних, які відповідають низьким температурам навколишнього середовища. І значення σ тим менші, чим вища температура $t_{\text{вх}}^r$ та вологовміст $X_{\text{вх}}^r$ димових газів за котлом;

- витрати теплоти на реалізацію повітряного методу є найменшими у порівнянні з двома іншими методами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Войцехівський О.В., Попов В.О., Дорохова Н.Д. Інноваційні технології улаштування і реконструкції залізобетонних димових труб. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2017. № 2. С. 13–18.
2. Фялко Н.М., Навродская Р.А., Шевчук С.И., Степанова А.И., Пресич Г.А., Гнедаш Г.А. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок: монография.: Київ: «Про формат». 2018. 248 с. ISBN 978-966-02-8640-5.
3. Fialko, N., Navrodska, R., Shevchuk, S., & Gnedash, G. (2023). Anticorrosive Protection of Gas Exhaust Ducts of Boiler Plants with Heat-Recovery Systems. In Systems, Decision and Control in Energy V (pp. 425-435). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_22
4. Козій О.І., Петрук М.П., Вахула О.М. Термічне знешкодження твердих побутових відходів: європейський досвід. Комунальне господарство міст. 2015. № 120(1). С. 122–125.
5. Fialko N.M., Navrodska R.O., Gnedash G.O., Presic G.O., and Shevchuk S.I. Study of Heat Recovery Systems for Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units. Nauka innov no. 2. P. 47—53. <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>

PROBLEMS OF GAS EXHAUST DUCTS OPERATIONAL RELIABILITY OF MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATION PLANTS AND WAYS TO SOLVE THEM

Fialko N.¹, Navrodska R.², Zhuchenko I.³, Shevchuk S.⁴,
Gnedash G.⁵

¹Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, 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

³postgraduate student, Vinnytsia National Technical University, 95 Khmelnytske shose, Vinnytsia, Ukraine, 21021, orcid.org/0009-0005-7342-284X, e-mail: ivanzhuchenko@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/0000-0001-8046-0039, e-mail: s.i.shevchuk@gmail.com

⁵PhD (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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.1>

The work is devoted to research on creating conditions for the safe operation of gas exhaust ducts of solid waste incineration plants. The operation of these ducts is characterized by difficult conditions that lead to their corrosion destruction, especially the last section of the duct - the chimney. The development of measures for the chimneys corrosion protection in the case of using deep flue gas heat recovery systems requires special attention due to the likely high humidity and high chemical aggressiveness of these gases. The purpose of the study is to analyze the indicators of thermal and humidity state in the chimney mouth of a waste incinerator plant with a water-heating

boiler in its different operation modes under the conditions of using the technology of deep cooling of exhaust gases and thermal methods of preventing condensation in gas exhaust ducts. The main objectives of the study were to perform thermal calculations of the boiler with the proposed heat recovery system and to establish patterns of change in the main thermal and humidity indicators at the mouth of the reinforced concrete chimney under different boiler operating conditions. Known thermal calculation methods of heat and power plants installations and the results of our own research on heat exchange during deep cooling of exhaust gases were used. The results on the effectiveness of using the methods of heat and humidity treatment of flue gases after heat recovery to prevent condensation in the reinforced concrete chimney of the considered boiler are presented. Three thermal methods were investigated: bypassing a part of the boiler exhaust gases past the heat recovery system, drying the cooled gases in a gas-heater, and mixing a part of the air heated in the system with these gases. The regularities of changes in thermal and humidity indicators in the chimney mouth are established and the limits of effective application of each method under different conditions are determined. It is shown that the bypassing method is not effective for preventing condensation under all the conditions considered; the drying method gives positive results for preventing condensation in the chimney mouth at high boiler loads corresponding to low ambient temperatures ($t_{amb} < -5^{\circ}\text{C}$), high gas temperatures at the boiler outlet ($t_{inp}^g > 200^{\circ}\text{C}$) and at the levels of heating of cooled gases in the gas-heater Δt , which mostly exceed 30°C ; the air method at the share of σ (up to 30 %) of the mixed air ensures the prevention of condensation in the chimney mouth in boiler operating conditions close to the nominal. It is also shown that the heat consumption for the implementation of the air method is the lowest compared to the other two methods.

References 5, tables 4, figures 9.

Key words: chimneys, prevention of condensation, corrosion protection efficiency.

1. Voichevsky O., Popov V., Dorohova N. Inovatsiyni tekhnolohii ulashtuvannia i rekonstruktsii zalizobetonnykh dymovykh trub [Innovative technologies of embroidery and reconstruction of rail concrete chimneys]. Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi. 2017. № 2. P. 13–18. (in ukr.)

2. Fialko N. M., Navrodskaia R. A., Shevchuk S. I., Stepanova A. I., Presich G.O Gnedash G.O. Teplovyye metody zashchity gazootvodyashchikh traktov kotelnykh ustanovok [Thermal methods of gas exhaust ducts protection of boiler plants]. Kyiv: «Pro format». 2018. 248 p. ISBN 978- 966-02-8640-5. (in rus.)

3. Fialko, N., Navrodska, R., Shevchuk, S., & Gnedash, G. (2023). Anticorrosive Protection of Gas Exhaust Ducts of Boiler Plants with Heat-Recovery Systems. In *Systems, Decision and Control in Energy V* (pp. 425-435). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_22

4. Koziy O., Petruk M., Vakhula O. Термічне знешкодження твердих побутових відходів: європейський досвід [Thermal neutralization solid waste: european experience]. *Komunalne hospodarstvo mist.* 2015. № 120(1). P. 122–125. (in ukr.)

5. Fialko N.M., Navrodska R.O., Gnedash G.O., Presich G.O., and Shevchuk S.I. Study of Heat Recovery Systems for Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units. *Nauka innov* no. 2. P. 47—53. <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>

Отримано 04.02.2025

Received 04.02.2025

Прийнято до друку 18.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025