

ПРОБЛЕМИ ЗАХИСТУ ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТІВ УСТАНОВОК СПАЛЮВАННЯ СМІТТЯ

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

Відділ теплофізики енергоефективних теплотехнологій

E-mail: nmfialko@ukr.net

Анотація. *Наведено результати аналізу тепловологісного стану в гирлі димової труби установки для спалювання твердих побутових відходів (ТПВ), оснащеної опалювальним котлом та теплоутилізаційною системою для підвищення ефективності використання теплоти ТПВ. У теплоутилізаційній системі реалізується глибоке охолодження димових газів і нагрівання повітря на горіння та зворотної тепломережної води перед надходженням її до котла. Таке комбіноване використання утилізованої теплоти дозволяє підвищити ККД котла на $6 \div 10$ %. Для запобігання конденсації в газовідвідних каналах котла і димовій трубі застосовуються два теплові методи: підмішування до димових газів нагрітого в системі теплоутилізації повітря (повітряний метод) та метод зовнішньої теплоізоляції димової труби. Вихідні дані для розрахунків приймалися в практичному діапазоні при спалюванні 5 т/год побутових відходів з досвіду використання заводу «Енергія» (м. Київ). Розрахунки виконувалися в різних режимах експлуатації теплоутилізаційної системи протягом опалювального періоду, а саме: за вхідних температур повітря в діапазоні від -20 до $+10$ °С і температури та вологовмісту димових газів відповідно 250, 200 °С і 150, 200 г/кг с.г. Визначалися тепловологісні параметри (температура та точка роси) димових газів, а також температура внутрішньої поверхні в останній за ходом газів ділянці газовідвідного тракту сміттєспалювальної установки – гирлі димової труби. Встановлено, що за розглянутих умов використання лише повітряного методу не забезпечує відвернення конденсації в гирлі досліджуваної труби в деяких режимах роботи сміттєспалювальної котельної установки. Тому для запобігання випадінню вологи у цій трубі запропоновано ізолювати її зовнішню поверхню. За результатами досліджень показано, що за умов сумісного використання запропонованих теплових методів (повітряного та теплоізоляції) реалізується відвернення випадіння конденсату в усіх режимах експлуатації розглянутої сміттєспалювальної установки.*

Ключові слова: *сміттєспалювальні установки, димові гази, димові труби, теплові методи запобігання конденсаоутворенню*

Актуальність. Одним із важливих напрямів забезпечення енергетичної безпеки України є заміщення викопних палив альтернативними і відновлюваними джерелами енергії. Залучення до енергетичного балансу України твердих побутових відходів (ТПВ) є одним із важливих шляхів заміщення викопних палив. Серед технологій енергетичного використання ТПВ найпоширенішою і однією з найбільш ефективних є технологія їхнього спалювання. Так, у країнах ЄС сміттєспалювання перетворилося на своєрідну галузь енергетики [1-3].

Енергетичне використання потенціалу ТПВ покликано також сприяти вирішенню проблеми екологічної безпеки України завдяки зменшенню кількості звалищ та полігонів ТПВ і відповідному скороченню викидів парникових газів. Покращення екологічної безпеки пов'язано також із реалізацією умов нормативного розсіювання шкідливих викидів при застосуванні технологій спалювання сміття. Тому під час проектування та експлуатації цих сміттєспалювальних установок велика увага приділяється забезпеченню антикорозійного захисту їхніх газовідвідних каналів та димових труб за умов дотримання нормативних умов розсіювання шкідливих викидів, що містяться в продуктах згоряння ТПВ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При реалізації технологій спалювання твердих побутових відходів (ТПВ) та штучних палив з них газовідвідним каналам притаманні ті ж проблеми, що і для інших паливоспоживальних енергетичних об'єктів. Однією з цих проблем є конденсаоутворення у відвідних газоходах та димовій трубі, що призводить до корозійного руйнування газовідвідних трактів і зниження експлуатаційної надійності установки спалювання ТПВ [4]. Ця проблема посилюється у разі застосування теплоутилізаційних технологій з поглибленим охолодженням димових газів [5]. Для сміттєспалювальних установок посилення проблеми пов'язано також із вмістом в продуктах згоряння хімічно агресивних речовин. Зокрема, за літературними даними [1, 2, 6] у димових газах містяться у газоподібному стані сполуки хлору, фтору, аміаку, азоту тощо, а також твердий виніс різного хімічного

та фракційного складу. Особливої небезпеки корозійного руйнування, як завжди, зазнає внутрішня поверхня гирла димової труби, останньої за ходом димових газів ділянки газовідвідного тракту сміттєспалювальних установок. Зважаючи на вищевикладене, вирішення проблеми антикорозійного захисту газовідвідних трактів цих установок є актуальним завданням.

Мета роботи полягає у визначенні та аналізі показників тепловологісного стану в гирлі димової труби сміттєспалювальної установки в різних режимах її експлуатації за умов застосування технології глибокого охолодження димових газів з використанням теплових методів запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах.

Матеріали та методи досліджень. Використовувалися відомі методи теплового розрахунку теплообмінних апаратів та димових труб. За умов глибокого охолодження димових газів в теплообмінниках-теплоутилізаторах застосовувалася методика, розроблена в Інституті технічної теплофізики НАН України [7].

Результати досліджень та їх обговорення. Розрахункові дослідження виконувалися для установки з продуктивністю спалювання сміття 5 т/год. Установка призначена для використання теплоти згоряння ТПВ в котлі, що працює для потреб опалення. Установка оснащена комбінованою системою утилізації теплоти відхідних димових газів котла, де утилізована теплота використовується для попереднього нагрівання повітря на горіння та зворотної тепломережної води перед надходженням цих теплоносіїв до котла. Схематичне зображення установки наведено на рис. 1.

Застосовувалася залізобетонна димова труба з параметрами: висота 120 м, внутрішній діаметр 1,8 м, товщина оболонки приймалася 0,16 м. Необхідною вимогою безпечної експлуатації газовідвідного тракту та димової труби розглянутої установки в разі застосування теплоутилізаційних технологій є виконання умови, за якої температура внутрішньої поверхні $t_{\text{пов}}$ гирла димової труби повинна перевищувати точку роси t_p димових газів, $t_{\text{пов}} > t_p$. Для запобігання конденсатоутворенню в димовій трубі застосовувався повітряний метод [8]. Цей метод полягає у зміні тепловологісних характеристик димових газів після

теплоутилізації при підмішуванні до них перед димовою трубою сухого та нагрітого повітря, яке нагрівається у газогрійному повітрянагрівачі установки. Цей метод є ефективним за високих вологовмістах димових газів та їх глибокому охолодженні в теплоутилізаційній системі, де байпасування не вбачається доцільним.

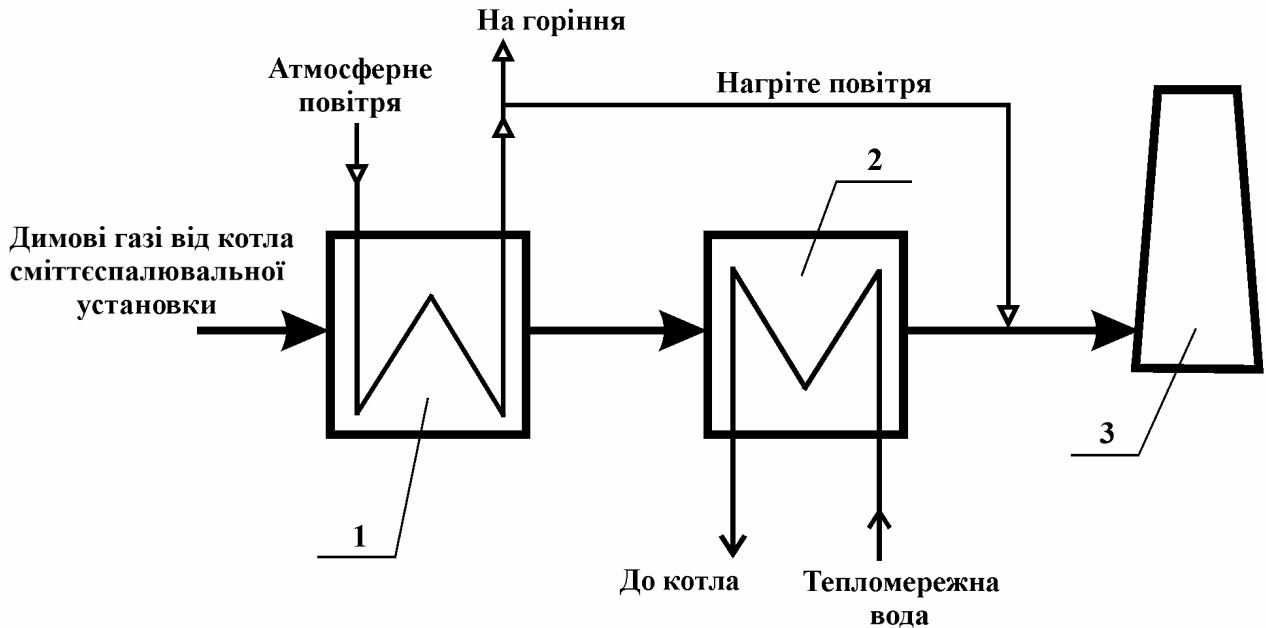


Рис. 1. Теплоутилізаційна система для сміттєспалювальної установки:
1 – повітрянагрівач; 2 – водопідігрівач; 3 – димова труба

Вихідні дані для виконання досліджень наведено в табл. 1.

1. Вихідні дані

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 ÷ 0,20
Вологовміст димових газів на вході в димову трубу, кг/кг с.г.	0,95 ÷ 0,20
Температура димових газів після котла, °С	200 ÷ 250
Температура димових газів на вході в димову трубу, °С	52 ÷ 84
Температура зворотної води системи опалення, °С	35 ÷ 70
Температура води після водогрійного теплоутилізатора, °С	37,2 ÷ 72,1
Температура повітря на воді у повітрогрійний теплоутилізатор, °С	-20 ÷ +10
Температура повітря на виході з повітрогрійного теплоутилізатора, °С	137 ÷ 197
Частка підмішуваного нагрітого повітря	0,05 ÷ 0,2
Вологовміст нагрітого повітря, кг/кг с.г.	0,01

Визначалися теплові показники теплоутилізаційної системи та тепловологісні показники димових газів у гирлі димової труби, а також температура внутрішньої поверхні гирла труби в різних режимах експлуатації установки спалювання ТПВ. За

результатами виконаних теплових розрахунків показано, що завдяки використанню пропонуваної теплоутилізаційної системи ККД котла установки підвищується на $6 \div 10$ %.

На рис. 2, 3 наведено дані розрахункових досліджень тепловологісних показників димових газів та температури внутрішньої поверхні застосовуваної димової труби на виході з її гирла за умови використання лише повітряного методу запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних каналах.

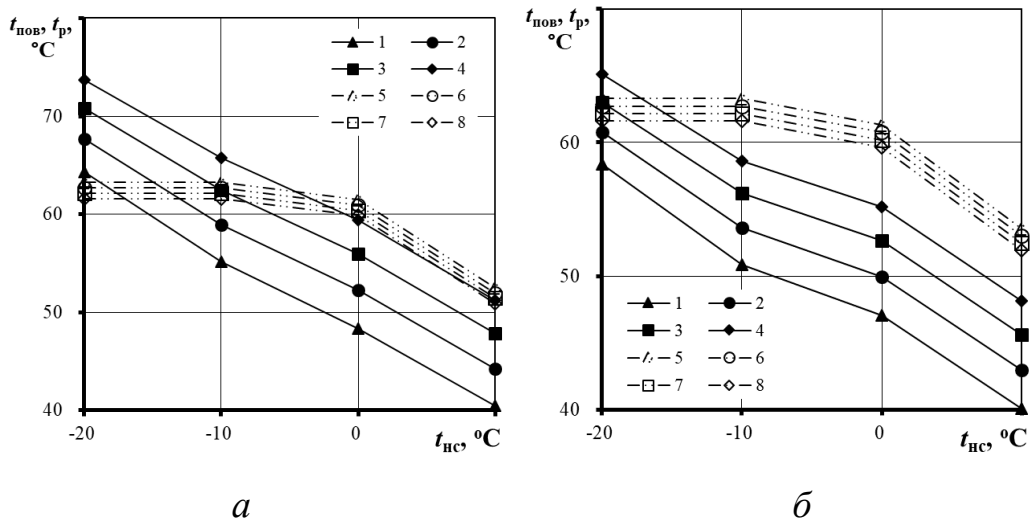


Рис. 2. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі димової труби (1-4) і точки роси t_p (5-8) за різних температур димових газів на вході $t_{вх}^r$ та часток підмішаного повітря σ при початковому вологовмісті димових газів 200 г/кг с.г.:

$$a - t_{вх}^r = 250 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad б - t_{вх}^r = 200 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$1, 5 - \sigma = 5 \text{ } \%; \quad 2, 6 - 10 \text{ } \%; \quad 3, 7 - 15 \text{ } \%; \quad 4, 8 - 20 \text{ } \%$$

Аналіз отриманих результатів свідчить, що при застосуванні лише повітряного методу в сміттєспалювальних установках запобігання конденсатоутворенню при частках підмішування σ до 20 % реалізується лише в режимах роботи установки, близьких до номінального, які відповідають низьким температурам навколишнього середовища. При цьому значення σ тим менші, чим вища температура t_r та вологовміст X_r димових газів на вході теплоутилізаційної установки, нижча температура навколишнього середовища $t_{нс}$ (більше навантаження котла).

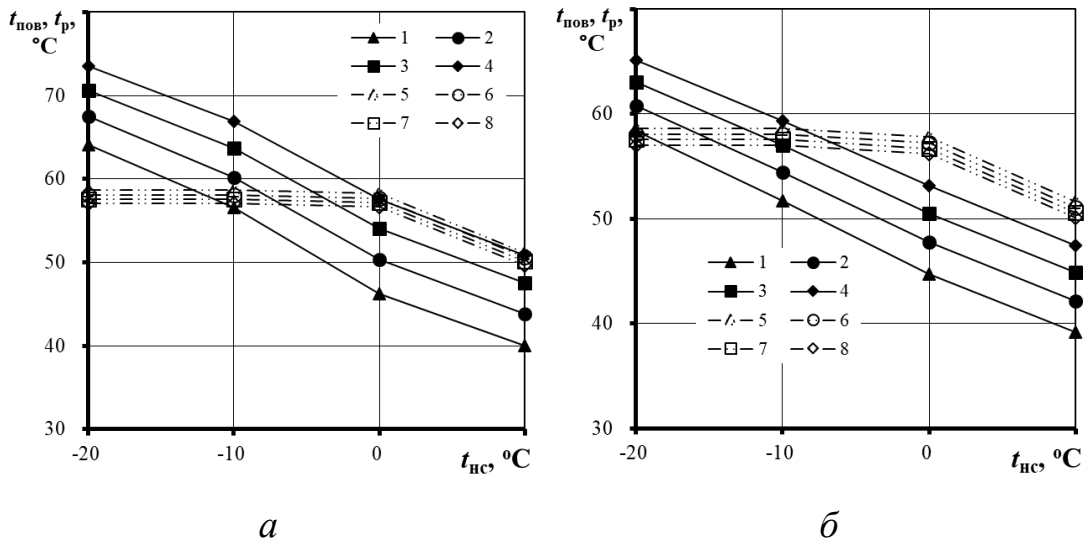


Рис. 3. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі димової труби (1-4) і точки роси t_p (5-8) за різних температур димових газів на вході $t_{вх}^r$ та часток підмішаного повітря σ при початковому вологовмісті димових газів 150 г/кг с.г.:

а – $t_{вх}^r = 250$ °C; б – $t_{вх}^r = 200$ °C;
 1, 5 – $\sigma = 5$ %; 2, 6 – 10 %; 3, 7 – 15 %; 4, 8 – 20 %

Для запобігання конденсатоутворенню в димовій трубі досліджуваної сміттєспалювальної установки у всіх режимах її експлуатації запропоновано теплоізулювати зовнішню поверхню цієї труби. Теплоізуляційним матеріалом слугує сучасний ефективний матеріал: полотно з мінераловати з базальтового волокна ($\lambda = 0,038$ Вт/(м·°C); $\delta = 50$ мм) ТУ 5284-048-00110473-2001.

Рисунок 4 ілюструє характерні результати розрахункових досліджень для ізольованої залізобетонної труби. За результатами досліджень можна зробити висновок, що для запобігання конденсатоутворенню у залізобетонній димовій трубі у всіх режимах експлуатації установки спалювання ТПВ достатньо використання одного шару вибраної теплоізуляції для відвернення конденсатоутворення в гирлі розглянутої димової труби. При цьому частка підмішаного повітря не перевищує 5%.

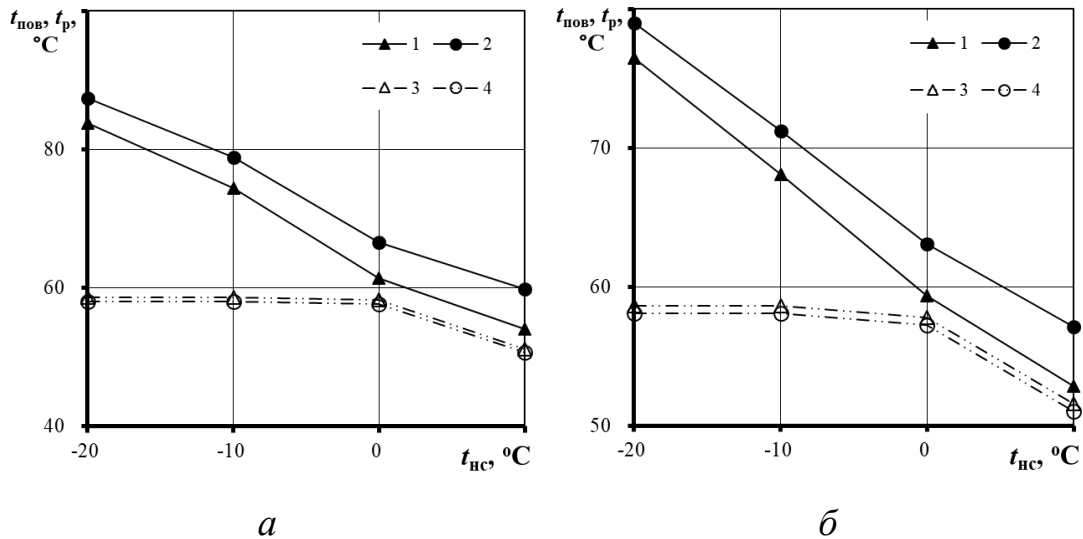


Рис. 4. Залежність від температури навколишнього середовища $t_{нс}$ температури внутрішньої поверхні $t_{пов}$ в гирлі димової труби (1, 2) і точки роси t_p (3, 4) за різних температур димових газів на вході $t^r_{вх}$ та часток підмішуваного повітря σ при початковому вологовмісті димових газів 150 г/кг с.г.:

$$a - t^r_{вх} = 250 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad б - t^r_{вх} = 200 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$1, 3 - \sigma = 5 \text{ } \%; \quad 2, 4 - 10 \text{ } \%$$

Висновки і перспективи. Виконано розрахункові дослідження щодо аналізу тепловологісного стану в гирлі димової труби установки для спалювання твердих побутових відходів (ТПВ), оснащеної опалювальним котлом та теплоутилізаційною системою для ефективного використання теплоти ТПВ. Для запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних каналах котла та димовій трубі застосовуються два теплові методи: підмішування до димових газів нагрітого в системі теплоутилізації повітря (повітряний метод) та зовнішньої теплоутилізації димової труби. За результатами досліджень показано, що:

- застосування запропонованої теплоутилізаційної системи дозволяє підвищити ККД котла установки на $6 \div 10 \text{ } \%$;

- за умов використання лише повітряного методу з часткою підмішування нагрітого повітря до 20 % не відбувається запобігання конденсатоутворенню в гирлі розглянутої труби в деяких режимах роботи сміттєспалювальної котельної установки протягом опалювального періоду;

- комплексне застосування двох запропонованих методів забезпечує відвернення випадіння конденсату в усіх режимах експлуатації розглянутої сміттєспалювальної установки з часткою підмішування повітря, що не перевищує 5 %.

Результати виконаних досліджень будуть використанні для підвищення теплової ефективності та надійності установок спалювання твердих побутових відходів та інших паливоспоживальних теплових установок за умов застосування теплоутилізаційних систем.

Отримані наукові результати використовуватимуться також в учбовому процесі під час підготовки відповідних фахівців.

Список використаних джерел

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

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

2. 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.

4. Serris, E., Cournil, M., & Peultier, J. (2007, October). Modelling and simulation of condensation phenomena of acid gases in an industrial chimney. In *XI^o Congrès de la Société Française de Génie des Procédés. Des réponses industrielles pour une société en mutation*. (No. 96, pp. ISBN-2). Société Française de Génie des Procédés. <https://hal.science/hal-00451762/>

5. Fialko N. M., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Gnedash G. O. The environmental reliability of gas-fired boiler units by applying modern heat-recovery technologies. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*. 2020. No2. P. 96-100. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/096>

6. 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.

7. Навродская Р.А., Степанова А.И., Шевчук С.И., Гнедаш Г.А., Пресич Г.А. Экспериментальное исследование теплообмена при глубоком охлаждении продуктов сгорания газопотребляющих котлов. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Т.28, №6. С. 103-108. <https://doi.org/10.15421/40280620>

8. 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.

References

1. Johnke, B. (2000). Emissions from waste incineration. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, 455-468.
2. Magera Y. M. (2019). Pidvyshchennia efektyvnosti termichnoi insineratsii tverdykh pobutovykh vidkhodiv [Improving of the efficiency of municipal solid waste thermal incineration. Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. Kyiv, 161p.
3. Koziy, O. I., Petruk, M. P., Vakhula, O. M. (2015). Thermal neutralization solid Waste: European Experience V zb. Komunalne hospodarstvo mist, Kharkiv, 120(1), 122-125.
4. Serris, E., Cournil, M., & Peultier, J. (2007, October). Modelling and simulation of condensation phenomena of acid gases in an industrial chimney. In *XI^o Congrès de la Société Française de Génie des Procédés. Des réponses industrielles pour une société en mutation*. (No. 96, pp. ISBN-2). Société Française de Génie des Procédés. <https://hal.science/hal-00451762/>
5. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., Gnedash, G. O. (2020). The environmental reliability of gas-fired boiler units by applying modern heat-recovery technologies. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovi Visnyk*, (2), 96-100. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/096>
6. 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.
7. Navrodska, R. A., Stepanova, A. I., Shevchuk, S. I., Gnedash, G. A., & Presich, G. A. (2018). Experimental investigation of heat-transfer at deep cooling of combustion materials of gas-fired boilers. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(6), 103–108. <https://doi.org/10.15421/40280620>
8. 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.

PROBLEMS OF GAS EXHAUST DUCTS PROTECTION OF WASTE INCINERATION PLANTS

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

Abstract. *The results of the analysis the thermal and humidity state at the chimney orifice of waste incineration plant equipped with a heating boiler and a heat recovery system to increase the efficiency of solid household waste (SHW) heat recovery are presented. In the heat recovery system implements waste gases deep cooling and heating of combustion air and return heat-network water before it enters the boiler. This combined use of recovered heat allows increasing the boiler's efficiency by 6 ÷ 10 %. Two thermal methods are used to prevent condensate formation in the boiler's exhaust ducts and chimney: mixing air heated in the heat recovery system into the waste gases (air method)*

and the method of chimney external thermal insulation. The initial data for calculations were taken in the practical range for the combustion of 5 t/h of household waste from the experience of using the "Energia" plant (Kyiv). The calculations were performed in different operating modes of the heat recovery system during the heating period, namely, at inlet air temperatures ranging from -20 to +10 °C and exhaust gas temperatures and moisture content of 250, 200 °C and 150, 200 g/kg of dry gases, respectively. The thermal and humidity parameters (temperature and dew point) of the waste gases, as well as the temperature of the inner surface in the last section of the gas exhaust duct of the waste incinerator - at the chimney orifice were determined. It has been established that under the considered conditions, the use only the air method does not prevent condensation at the chimney orifice in some operating modes of the waste incineration boiler plant. Therefore, to prevent condensation in this chimney, it is proposed to insulate its external surface. The research results show that under the conditions of the combined use of the proposed thermal methods (air and thermal insulation), it is possible to prevent condensation in all operating modes of the considered waste incineration plant.

Key words: *waste incineration plants, waste gases, chimneys, thermal methods to prevent condensation*