

Технічні науки

УДК [621.181:662.613]:66.047.004.1

**Фіалко Наталія Михайлівна**

*доктор технічних наук, професор,  
член кореспондент НАН України, завідувач відділу  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Fialko Nataliia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Corresponding Member of NAS of Ukraine, department head  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Навродська Раїса Олександрівна**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Navrodska Raisa**

*Candidate of Technical Sciences (PhD),  
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Гнедаш Георгій Олександрович**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Gnedash Georgii**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Шевчук Світлана Іванівна**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Shevchuk Svitlana**

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Новаківський Максим Олександрович**

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України*

**Novakivskii Maksym**

*Candidate of Technical Sciences (PhD), Senior Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**ОСНОВНІ УМОВИ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ УТВОРЕННЯ  
КОНДЕНСАТА У ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТАХ ТА ДИМОВІЙ ТРУБИ  
КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК  
THE MAIN CONDITIONS FOR PREVENTING THE FORMATION OF  
CONDENSATE IN THE GAS EXHAUST TRACTS AND THE CHIMNEY  
OF BOILER PLANTS**

***Анотація.** Розглянуто умови, що впливають на конденсацію у газівідвідному тракті газоспоживальних котельних установок та чинники, що визначають тепловологісну обстановку у витяжних каналах. Наведено теплові методи захисту цих трактів та шляхи забезпечення надійної роботи димових труб.*

***Ключові слова:** відхідні димові гази, температура точки роси, конденсація, тепловологісний режим, теплоізоляція.*

***Summary.** The conditions that affect the formation of condensate in the gas exhaust tracts of gas-fired boiler plants and the factors that determine the thermal-humidity regime in the exhaust ducts are considered. Thermal methods*

*of protection of these tracts and ways to ensure reliable operation of chimneys are presented.*

**Key words:** *exhaust-gases, dew point temperature, condensation formation, thermal-humidity regime, thermal insulation.*

Підвищення ефективності використання палива у газоспоживальних опалювальних котельних установках шляхом застосування теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням відхідних газів [1-8] призводить до зниження температури цих газів, що сприяє посиленню процесу конденсатоутворення у відповідних димових каналах. Конденсація вологи виникає при зниженні температури газів у суміжному шарі при стінці газовідвідного каналу нижче температури точки роси водяної пари. Виникнення зазначених умов стає особливо вірогідним в зимовий період експлуатації котелень. Щонайбільшу небезпеку від впливу конденсату зазнає внутрішня поверхня газовідвідного ствола димової труби – останнього за ходом газів елемента котельної установки.

З урахуванням небезпеки конденсатоутворення надійність роботи газовідвідних трактів, в тому числі димових труб, може бути забезпечена двома шляхами [9-12]. Перший шлях,- який допускає конденсатоутворення,- передбачає підсилення теплоізоляції, а також вологостійкий і протикорозійний захист у сполученні з пристроями для відведення конденсату з подальшим його корисним використанням [13-16]. Другий шлях,- який запобігає конденсатоутворенню,- передбачає створення і підтримання у відповідній точці газовідвідного тракту необхідної температури і відносної вологості димових газів, сукупність яких виключає випадіння конденсату. В обох випадках забезпечення надійності газовідвідного тракту потребує відповідних капітальних вкладень і експлуатаційних витрат. Причому, якщо при спорудженні нової котельні в принципі може бути реалізований перший шлях, то у випадку

реконструювання існуючої котельні при дотриманні умови її безупинної роботи технічно можливим є другий шлях. У будь-якому разі не допускається утворення конденсату у стволах цегляних і залізобетонних труб, які відводять продукти спалювання газоподібного палива незалежно від режиму роботи котлоагрегатів у котельні.

Основним чинником, що визначає утворення конденсату в димовій трубі, є співвідношення температури газів, температури точки роси, яка залежить від вологовмісту газів, та температури внутрішньої поверхні стінки на вході в трубу. Зниження температури газів за інших рівних умов спричинює зниження температури внутрішньої поверхні стінки димової труби, наближаючи її до температури точки роси. Попередити конденсатуутворення в трубі можливо двома шляхами: перший – підвищенням температури газів і другим – зниженням температури точки роси, що досягається зменшенням вологовмісту газів підмішуванням сухого повітря або зниженням температури газів з конденсатовипадінням в газоохолоджувачі. При цьому температура точки роси для газів, що виходять з газоохолоджувача (вторинна точка роси) буде на  $15 \div 20$  °С меншою, ніж температура точки роси для газів, що входять в нього (первинна точка роси). Оскільки гази після охолодження знаходяться в стані, близькому до насичення, вони підлягають підігріванню в газопідігрівачі. Враховуючи, що через зменшення температурного напору між газами і зовнішнім повітрям температура внутрішньої поверхні стінки знижується менш інтенсивно, ніж температура точки роси, необхідний підігрів газів виявляється меншим порівняно з підігріванням газів без попереднього охолодження. Крім того, додатковий економічний ефект, який певною мірою компенсує витрати на осушування газів, досягається у разі використання теплоносія, що пройшов газоохолоджувач, на виробничі потреби (теплоутилізація), або на потреби системи осушування. При

застосуванні газоохолоджувача (конденсаційного теплоутилізатора) доцільним є його компонування з газопідігрівачем в одному агрегаті.

В котельній установці зі зрівноваженою тягою тепловологісна обстановка в газовідвідному тракті на ділянці від виходу з котлоагрегата до входу в димову трубу визначається в загальному випадку низкою чинників, як негативних з точки зору забезпечення надійності, так і позитивних.

До негативних чинників належить віднести:

- охолодження газів і збільшення їхньої відносної вологості в теплоутилізаторі;
- охолодження газів і збільшення їхнього вологовмісту внаслідок бризковиносу з теплоутилізатора або іншого потрапляння води в газохід при температурі газів, яка перевищує температуру води;
- охолодження газів внаслідок неорганізованого надходження (присосів) холодного повітря;
- охолодження газів внаслідок теплопередачі в навколишнє середовище;
- збільшення вологовмісту газів внаслідок підмішування гарячих газів.

До позитивних чинників відносяться:

- зниження температури точки роси водяної пари в димових газах при роботі теплоутилізатора (газоохолоджувача) в конденсаційному режимі;
- нагрівання газів і відповідне зменшення їхньої відносної вологості в поверхневому теплообміннику (газопідігрівачі);
- нагрівання газів і зменшення їхнього вологовмісту внаслідок надходження нагрітого сухого повітря;
- нагрівання газів внаслідок підмішування гарячих газів;

- нагрівання газів внаслідок бризковиносу з теплоутилізатора або іншого потрапляння води в газохід при температурі води, що перевищує температуру газів;
- зменшення вологовмісту газів внаслідок неорганізованого надходження (присосів) сухого повітря;
- нагрівання газів внаслідок деякого підвищення тиску в димососі (може бути знехтуване при практичних розрахунках).

В реальних умовах тепловологісна обстановка в димовій трубі визначається в загальному випадку низкою негативних з точки зору забезпечення надійності чинників, до яких належить віднести:

- охолодження газів по висоті труби внаслідок теплопередачі в навколишнє середовище;
- охолодження газів в напрямку від осі труби до стінки внаслідок теплопередачі;
- охолодження газів внаслідок їхнього ізоентропійного розширення.

При рішенні задачі запобігання конденсації в газовідвідному тракті аж до виходу з димової труби необхідно врахувати всі негативні чинники, що впливають на тепловологісну обстановку, та використати позитивні, інакше кажучи, урівноважити негативні чинники позитивними.

Рівняння, що описують мінімально необхідні умови, які забезпечують відсутність конденсації в газовідвідному тракті на ділянці між теплоутилізатором (газоохолоджувачем) і виходом з димової труби, мають вигляд:

$$\delta t_{\text{гп}} + \delta t_{\text{п}}^{\text{гт}} + \delta t_{\text{г}}^{\text{в}} - \delta t_{\text{гх}} - \delta t_{\text{тр}}^{\text{тп}} - \delta t_{\text{тр}}^{\text{із}} - \delta t_{\text{тр}}^{\text{у}} = 0 \quad (1)$$

$$t_{\text{ст}}^{\text{у}} - t_{\text{п}}^{\text{у}} = 0, \quad (2)$$

де  $\delta t_m$  – нагрів газів в поверхневому теплообміннику (газопідігрівачі);  $\delta t_n^{\Gamma}$  – нагрів (або охолодження) газів внаслідок підмішування газоподібного теплоносія (газів, повітря, пароповітряної суміші);  $\delta t_r^B$  – нагрів (або охолодження) газів внаслідок підмішування води (бризковиносу);  $\delta t_{rx}$  – охолодження газів на ділянці між теплоутилізатором і входом в димову трубу;  $\delta t_{tp}^{\text{III}}$  – охолодження газів по висоті димової труби внаслідок теплопередачі;  $\delta t_{tp}^{\text{IV}}$  – охолодження газів внаслідок ізоентропійного розширення їх по висоті димової труби;  $\delta t_{tp}^y$  – охолодження газів в усті димової труби в напрямку від осі труби до стінки;  $t_{ct}^y$  – температура внутрішньої поверхні стінки на виході газів з димової труби;  $t_p^y$  – температура точки роси водяної пари на виході газів з димової труби (приймається такою ж, як і на вході в трубу); визначається за формулою:

$$t_p^y = 16,129 \ln \frac{X_{tp}^y \cdot 10^4}{0,847\alpha_r + 37,67}, ^\circ\text{C} \quad (3)$$

де  $X_{tp}^y$  – вологовміст газів на виході з димової труби, кг/кг сухих газів;  $\alpha_r$  – коефіцієнт надлишку повітря в газах на виході з димової труби.

Значення  $X_{tp}^y$  та  $\alpha_r$  приймаються таким ж, як і на вході в трубу.

Вологовміст газів на виході з димової труби:

$$X_{tp}^y = X_{ty}^{\text{вих}} + \delta X_n^{\Gamma} + \delta X_n^B, \quad (4)$$

де  $X_{ty}^{\text{вих}}$  – вологовміст газів на виході з теплоутилізатора (газоохолоджувача);  $\delta X_n^{\Gamma}$  – змінення вологовмісту газів внаслідок підмішування газоподібного теплоносія;  $\delta X_n^B$  – змінення вологовмісту газів внаслідок підмішування (бризковиносу) або сепарації води.

Таким чином, всі перераховані вище чинники, що зумовлюють змінення температури газів, безпосередньо входять у рівняння (1), а ті, що зумовлюють змінення вологовмісту газів, через вирази (3) і (4) входять в рівняння (2).

Зведення балансу позитивних і негативних чинників, які впливають на тепловологісну обстановку в газовідвідному тракті котельної установки, дозволяє виявити необхідність осушування газів перед їхнім надходженням в димову трубу і визначити параметри теплоносіїв, які застосовуються для тепловологісної обробки.

Дослідження існуючих методів теплового захисту газовідвідних трактів показали, що ці методи узагальнюються двома: підмішування до газового потоку газоподібного теплоносія (димових газів або повітря) та підігрівання газів у поверхневому теплообміннику. Застосовуються також комбінації вищевказаних основних методів. Слід відзначити, що перший метод є ефективним, коли для підмішування використовується гаряче повітря. Він може застосовуватися в котельнях великої енергетики з котлоагрегатами, які оснащуються повітропідігрівачами. Стосовно опалювальних і опалювально-виробничих котелень з котлоагрегатами без повітропідігрівачів, найдоцільнішим є підігрівання газів в поверхневому теплообміннику.

### **Література**

1. Fialko N., Navrodska R., Gnedash G., Shevchuk S., Sbrodova G. Improvement of complex heat-recovery systems for gas-fired boiler units. *International Scientific Journal "Internauka"*. 2021. № 9. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-9-7427>
2. Fialko N. M., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Gnedash G. O., Glushak O. Y. Reduction of moisture content of exhaust gases in condensing heat-



- recovery exchangers of the boiler plants. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2019. 29(8). P. 116-119. doi: <https://doi.org/10.36930/40290821>
3. Fialko N. M., Presich G. A., Gnedash G. A., Shevchuk S. I., Dashkovska I. L. Increase the efficiency of complex heatrecovery systems for heating and humidifying of blown air of gasfired boilers. *Industrial Heat Engineering*. 2018. 40(3). P. 38–45. doi: <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.06>
  4. Fialko N. M., Gnedash G. O., Navrodska R. O., Presich G. O., Shevchuk S. I. Improving the efficiency of complex heat-recovery systems for gas-fired boiler installations. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2019. 29(6). P. 79-82. doi: <https://doi.org/10.15421/40290616>
  5. Navrodska R. A., Stepanova A. I., Shevchuk S. I., Gnedash G. A., Presich G. A. Experimental investigation of heat-transfer at deep cooling of combustion materials of gas-fired boilers. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2018. 28(6). P. 103-108. doi: <https://doi.org/10.15421/40280620>
  6. Fialko N. M., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Presich G. O., Shevchuk S. I. Study of Heat Recovery Systems for Heating and Moisturing Combustion Air of Boiler Units. *Nauka innov*. 2020. V. 16, No. 2. P. 47-53. doi: <https://doi.org/10.15407/scin16.03.047>
  7. Фіалко Н. М., Пресіч Г. О., Навродська Р. О., Гнедаш Г. О. Екологічна ефективність комбінованих систем утилізації теплоти викидних газів котельної установки. Вісник Національного університету «Львівська політехніка», Теорія і практика будівництва. 2013. № 755. С. 429-434. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/22345>
  8. Navrodska R., Fialko N., Presich G., Gnedash G., Alioshko S., Shevcuk S. Reducing nitrogen oxide emissions in boilers at moistening of blowing air in heat recovery systems. In *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 100. P. 00055. EDP Sciences. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910000055>
  9. Fialko N., Navrodska R., Shevchuk S., Presich G., Gnedash G. The use of thermal methods to protect the exhaust-channels of boilers equipped with

- heat-recovery units. *International scientific journal "Internauka"*. 2019. № 11(73).
10. Fialko N. M., Navrodska R. O., Presich G. A., Gnedash G. A., Shevchuk S. I. Application of an air method for protecting chimneys of boiler plants in heat recovery systems. *International Scientific Journal "Internauka"* 2020. № 4(84). P. 84-87. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-4>
11. Fialko N. M., Navrodska R. O., Shevchuk S. I., Gnedash G. O., Sbrodova G. O. Applying the air methods to prevent condensation in gas exhaust ducts of the boiler plants. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2018. № 28(10). P. 76-80. doi: <https://doi.org/10.15421/40281016>
12. Fialko N., Navrodska R., Gnedash G., Presich G., Shevchuk S. Methods for protecting boiler chimneys against corrosion due to fall-out condensate from flue gases. *International scientific journal "Internauka"*. 2021. № 9(109). P. 30-32. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-9-7426>
13. Fialko N. M., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Novakivskii M. O., Presich G. O. Directions for the use of chemically aggressive water condensate in gas-fired boiler plants of municipal energy. *International scientific journal "Internauka"*. 2022. №3. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-3-7948>
14. Fialko N. M., Navrodska R. O., Gnedash G. O., Shevchuk S. I., Presich G. O. Neutralization of acidic water condensate of gas-fired boiler units by decarbonization method into the granular type filter. *International scientific journal "Internauka"*. 2022. №4. doi: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-4-7971>
15. Fialko N., Navrodska R., Gnedash G., Novakivskii M., Sbrodova G. Use and disposal of acidic water condensate from gas-fired boiler units. *Municipal Economy of Cities*. 2021. № 4(164). P. 24-30. doi: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-24-30>

16. Fialko N., Navrodska R., Gnedash G., Novakivskii M. Practical application of chemically aggressive water condensate in gas-fired boiler plants of municipal power. *In the 11 th International scientific and practical conference “International scientific innovations in human life” (May 11-13, 2022). Cognum Publishing House, Manchester, United Kingdom. 2022. 810 p. (p. 188).*