

### 3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ



Науковий вісник НЛТУ України  
Scientific Bulletin of UNFU

<https://nv.nltu.edu.ua>

<https://doi.org/10.15421/40281016>

Article received 20.10.2018 р.

Article accepted 29.11.2018 р.

УДК 621.1.016:621.184



ISSN 1994-7836 (print)  
ISSN 2519-2477 (online)

@ ✉ Correspondence author

R. O. Navrodska

navrodska-itf@ukr.net

**Н. М. Фіалко, Р. О. Навродська, С. І. Шевчук, Г. О. Гнедаш, Г. О. Сбродова**

*Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна*

#### ЗАСТОСУВАННЯ ПОВІТРЯНОГО МЕТОДУ ЗАПОБІГАННЯ КОНДЕНСАТОУТВОРЕННЮ В ГАЗОВІДВІДНИХ ТРАКТАХ КОТЕЛЕНЬ

Викладено результати дослідження ефективності використання в теплоутилізаційних технологіях газоспоживальних опалювальних та промислових котелень повітряного методу відвернення конденсатоутворення у газовідвідних трактах. Розглянуто котельні установки з глибоким охолодженням відхідних газів, оснащені водогрійними теплоутилізаторами, призначеними для нагрівання зворотної тепломережної води та води іншого призначення. Досліджено за різних режимів котлів тепловологісний стан у димових трубах різного типу під час використання для зниження вологості та підвищення температури вихідних газів сухого та нагрітого повітря від повітрянагрівача котла. Визначено в розглянутих умовах основні параметри систем антикорозійного захисту димових труб, що забезпечують відвернення в них конденсатоутворення за дотримання нормативних режимів експлуатації цих труб. За значеннями одержаних параметрів виконано порівняльний аналіз ефективності застосування розглянутого методу антикорозійного захисту газовідвідних трактів для різних теплоутилізаційних установок. Показано, що використання в теплоутилізаційних технологіях котлів методу підмішування нагрітого повітря забезпечує відвернення конденсатоутворення в димових трубах з різною часткою цього повітря у вихідних газах. Величина цієї частки залежить від режиму роботи котла, призначення утилізованої теплоти, характеристики димової труби тощо.

**Ключові слова:** теплоутилізаційні технології; глибоке охолодження відхідних газів; вологість; точка роси; димові труби; ефективність антикорозійного захисту.

**Вступ.** Значного впровадження в котельнях теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням відхідних газів котлів і використанням теплоти конденсації водяної пари, що міститься в цих газах, немає через проблеми, однією з яких є конденсатоутворення в газовідвідних трактах, що спричинює їх корозійне руйнування (Fialko et al., 2018; Fialko et al., 2017; Navrodska et al., 2017; Khvorenkov et al., 2017). Для захисту газовідвідних каналів котельних установок в умовах застосування теплоутилізаційних технологій використовують теплові методи відвернення конденсату на внутрішніх поверхнях цих каналів. Серед них особливо вирізняються методи, пов'язані з тепловологісною обробкою димових газів котлів після їхньої теплоутилізації (Fialko et al., 2016; Dolinsky et al., 2014; Fialko et al., 2014). Це методи часткового байпасування відхідних газів котла повз теплоутилізаційне устаткування, підсу-

шування охолоджених у цьому устаткуванні газів у додатковому теплообміннику-газопідігрівачі та підмішування до цих газів сухого та нагрітого повітря.

Найбільш широкого застосування під час розроблення теплоутилізаційних технологій набули перші два із зазначених методів. Застосування третього методу, що отримав назву повітряного, є дуже обмеженим. Суть цього методу полягає у зниженні відносної вологості та підвищенні температури димових газів котельних установок перед надходженням цих газів до димової труби способом додавання до них частини  $\sigma$  нагрітого повітря з незначною вологістю. Обмеженість застосування цього методу пов'язана, з одного боку, з невеликою кількістю котелень, обладнаних повітропідігрівачами, а з іншого – з відсутністю даних щодо ефективності цього методу. Тому дослідження теплофізичних аспектів та ефективності використання для захисту газовід-

#### Інформація про авторів:

**Фіалко Наталія Михайлівна**, д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу.

Email: nmfialko@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>

**Навродська Раїса Олександрівна**, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, пров. наук. співробітник. Email: navrodska-itf@ukr.net

**Шевчук Світлана Іванівна**, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник. Email: s.i.shevchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-8046-0039>

**Гнедаш Георгій Олександрович**, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник. Email: navrodska-itf@ukr.net

**Сбродова Галина Олександрівна**, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співробітник. Email: navrodska-itf@ukr.net

**Цитування за ДСТУ:** Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Гнедаш Г. О., Сбродова Г. О. Застосування повітряного методу запобігання конденсатоутворенню в газовідвідних трактах котелень. Науковий вісник НЛТУ України. 2018, т. 28, № 10. С. 76–80.

**Citation APA:** Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., Gnedash, G. O., & Sbrodova, G. O. (2018). Applying the air methods to prevent condensation in gas exhaust ducts of the boiler plants. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(10), 76–80.

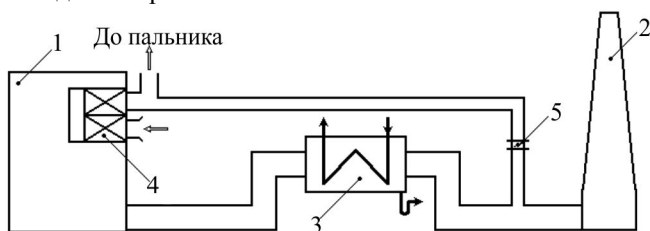
<https://doi.org/10.15421/40281016>

відних трактів котельних установок методу підмішування нагрітого повітря в системах теплоутилізації є основним завданням цієї роботи.

**Мета дослідження** полягає у теплофізичному обґрунтуванні використання в опалювальних котельних установках із глибоким охолодженням димових газів повітряного методу запобігання конденсації в газівідвідних трактах.

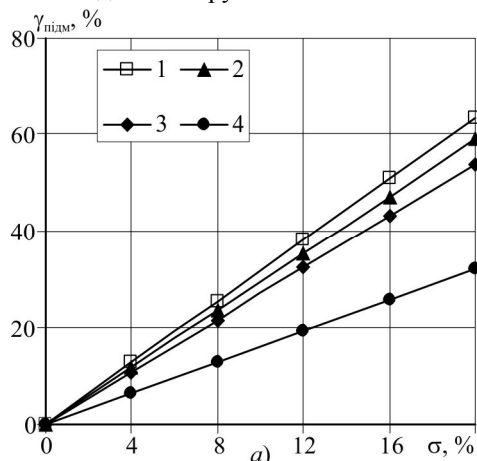
Для розуміння подальшого викладення матеріалу введемо такі умовні позначення:  $Q$  – теплопродуктивність, кВт;  $t$  – температура, °С;  $X$  – вологовміст, кг/кг с.п.;  $\gamma$  – коефіцієнт відносних витрат теплоти, %;  $\sigma$  – частка підмішаного повітря, %; *с.п.* – сухе повітря. А також будемо використовувати такі індекси: *вит* – витрати; *нс* – навколишнє середовище; *гн* – гази в номінальному режимі; *гп* – гаряче повітря; *підм* – підмішування; *пов* – поверхня; *р* – роса.

**Матеріали та методика дослідження.** Дослідження виконували під час застосування для котельних установок теплоутилізаційних систем з одиночними теплоутилізаторами, призначеними для нагрівання зворотної тепломережної води або води іншого призначення, наприклад холодної води систем гарячого водопостачання або хімоводоочищення, технологічних потреб тощо. Схему котельної установки, оснащеної системою теплоутилізації з використанням повітряного методу запобігання конденсації в газівідвідному тракті, наведено на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципова схема котельної установки з повітряним методом запобігання конденсації в газівідвідному тракті під час використання водогрійного теплоутилізатора: 1) котел; 2) димова труба; 3) водогрійний теплоутилізатор; 4) повітрянагрівач; 5) регулювальний клапан.

У цій схемі для підвищення температури димових газів та зменшення їхньої абсолютної вологості після теплоутилізації використовують повітря, нагріте в повітрянагрівачі котла. Необхідна частка цього повітря визначається умовами охолодження димових газів у відвідних каналах та димовій трубі.

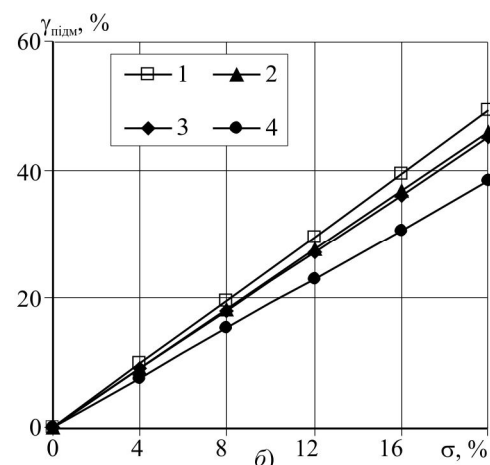


З метою визначення ефективності використання повітряного методу для запобігання конденсації в газівідвідних трактах розраховувались температури точки роси  $t_p$  димових газів і поверхні  $t_{пов}$  у найвразливішій ділянці газівідвідного тракту – в усті димової труби. При цьому розглядали типові димові труби різного типу: цегляну та металеву (висота труб 45 м, внутрішній діаметр 0,8 м). Дослідження виконували піл час застосування повітряного методу в системах теплоутилізації комунальних та промислових котелень з котлами КСВа – 2.0 Г теплопродуктивністю 2 МВт за умови різних температур відхідних газів у номінальному режимі  $t_{гн}$  (200 та 160 °С) за температур навколишнього середовища  $t_{нс}$  впродовж опалювального періоду. Параметри підмішаного повітря відповідали значенням на виході з повітропідігрівачів котлів:  $t_{гп} = 150-250$  °С;  $X_{гп} = 0,01$  кг/кг с.п.

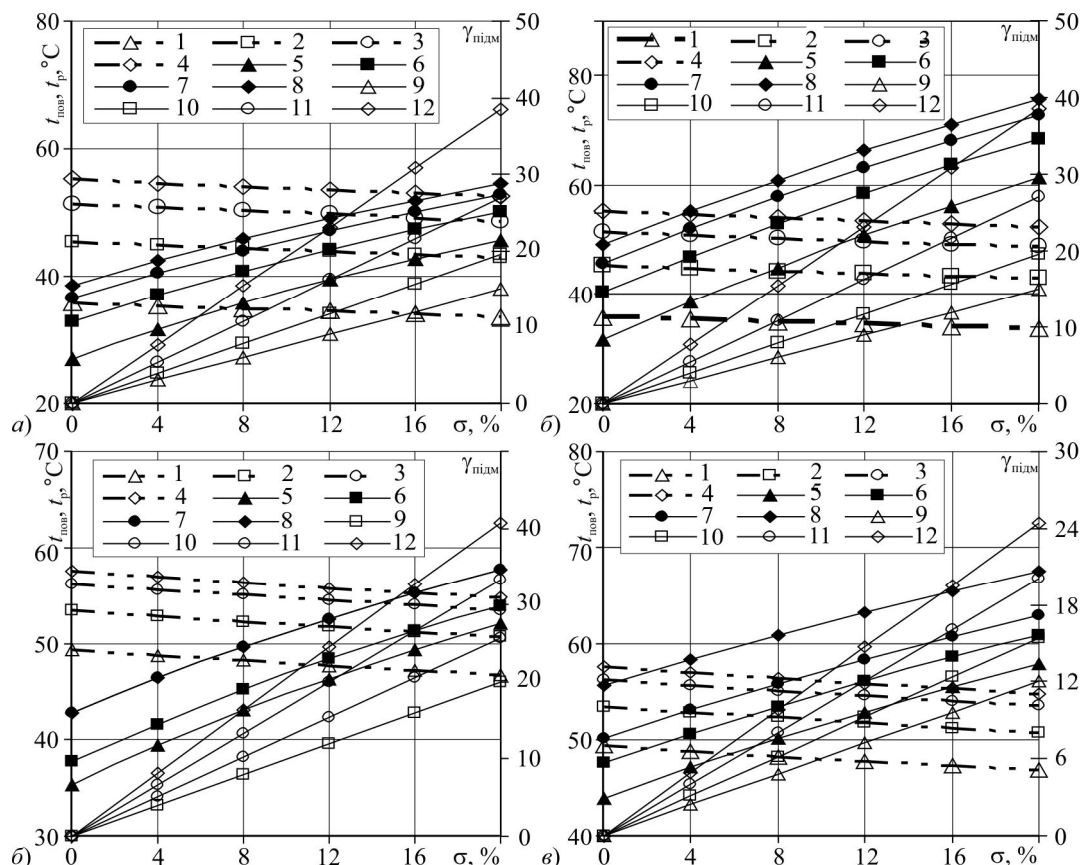
Для оцінювання ефективності застосування цього методу використовували відношення теплової потужності, необхідної для реалізації методу, до теплопродуктивності теплоутилізаційного устаткування ( $\gamma = Q_{вит}/Q_{му} \cdot 100$ ).

**Результати дослідження.** Характерні результати виконаних досліджень стосовно зазначених основних теплових характеристик ( $t_{нов}$ ,  $t_p$ ,  $\gamma_{підм}$ ) під час використання повітряного методу для опалювальної котельні з двома типами димових труб за умов використання водогрійного теплоутилізатора за температури підмішаного повітря 250 °С подано на рис. 2, 3.

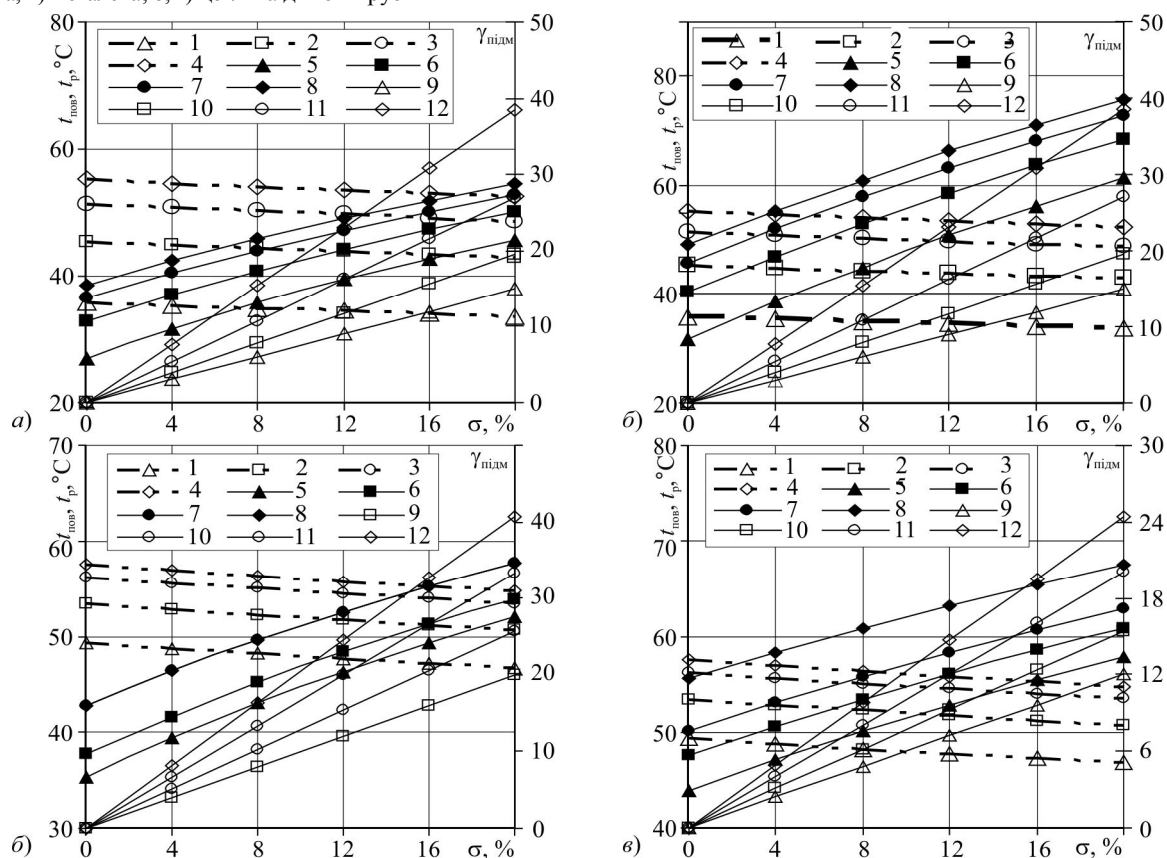
Дані, наведені на рис. 4, ілюструють результати відповідних розрахунків для тих же димарів в умовах промислових котелень у разі використання нагрітої за рахунок теплоутилізації води для різних потреб. Початкова температура цієї води змінювалась в межах 10÷40 °С. Результати дослідження стосовно промислових котелень наведено для температури навколишнього середовища  $t_{нс} = 10$  °С, за якої, як показали дослідження, найбільш сприятливі умови для конденсації в димовій трубі. За цих обставин через значне зниження теплового навантаження котлів, температур їхніх відхідних газів і нагрітої води відбувається глибше охолодження газів у теплоутилізаторі та димовій трубі. Про це свідчать отримані дані для опалювальних котелень, наведені на рис. 3.



**Рис. 2.** Залежність коефіцієнта відносних витрат теплоти  $\gamma_{підм}$  на реалізацію повітряного методу від частки підмішаного повітря  $\sigma$  за температури повітря  $t_{гп} = 250$  °С для  $t_{гн} = 160$  °С (а) та  $t_{гн} = 200$  °С (б): 1 –  $t_{нс} = -20$  °С; 2 –  $-10$  °С; 3 –  $0$  °С; 4 –  $10$  °С



**Рис. 3.** Залежність для опалювальної котельні температури внутрішньої поверхні  $t_{нов}$  в усті димової труби (1–4) і точки роси  $t_p$  (5–8) від температури навколишнього середовища  $t_{nc}$  під час підмішування повітря з часткою  $\sigma$  і температурою  $t_{zn} = 250$  °C для значень температур відхідних газів у номінальному режимі  $t_{zn} = 160$  °C (а, б) і  $t_{zn} = 200$  °C (в, г): 1,5 –  $\sigma = 0\%$ ; 2,6–8,0%; 3,7–12,0%; 4,8–20,0%; а, в) металева; б, г) цегляна димові труби



**Рис. 4.** Залежність температур внутрішньої поверхні  $t_{нов}$  в усті димової труби (1–4) та точки роси  $t_p$  (5–8) і коефіцієнта відносних витрат теплоти  $\gamma_{підм}$  (9–12) від частки підмішуваного повітря  $\sigma$  для промислової котельні за температури гарячого повітря  $t_{zn} = 250$  °C і температури навколишнього середовища  $t_{nc} = 10$  °C за умов різних значень температури  $t_e$  нагріваної в теплоутилізаторі води і температур відхідних газів у номінальному режимі  $t_{zn} = 160$  °C (а, б) і  $t_{zn} = 200$  °C (в, г): 1,5,9 –  $t_e = 10$  °C; 2,6,10 – 20 °C; 3,7,11 – 30 °C; 4,8,12 – 40 °C; а, в) металева; б, г) цегляна димові труби

Результати проведених досліджень показали, що повітряний метод забезпечує відвернення конденсатоутворення у цегляній димовій трубі для температури підмішаного повітря  $t_{zn} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  та температури відхідних газів у номінальному режимі  $t_{zn} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  за коефіцієнта відносних витрат  $\gamma_{нідм}$  на реалізацію методу 12 і 4 % в опалювальних та промислових котельнях відповідно. При цьому частка підмішаного повітря у загальній витраті димових газів не перевищує 4,5 %.

Отримані дані досліджень свідчать, що значення  $\sigma$  та  $\gamma_{нідм}$  тим менші, чим вища температура димових газів  $t_{zn}$  та нагрітого повітря  $t_{zn}$ , нижча температура навколишнього середовища  $t_{nc}$  (більше навантаження котла) за інших рівних умов. Так під час застосування повітряного методу у опалювальних котельнях за  $t_{zn} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $t_{zn} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  для запобігання конденсатоутворенню у цегляній димовій трубі необхідно підмішувати до 8 % повітря, що відповідає коефіцієнту витрат  $\gamma_{нідм}$  на реалізацію методу близько 12 %, а за  $t_{zn} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$  частка гарячого повітря  $\sigma$  збільшується до 23 %.

Для металевого ж димаря, як показали результати виконаних досліджень, максимальне значення  $\sigma$  для опалювальних котелень збільшується до 45 %, а коефіцієнт  $\gamma_{нідм} = 43\text{ }%$ . Для зменшення рівня використання теплоти у вигляді нагрітого повітря для металевих димарів опалювальних котелень доцільно використовувати разом із повітряним методом заходи, які забезпечують зменшення теплових втрат із корпусу димарів у навколишнє середовище. Це теплоізоляція корпусу димової труби, організація в ньому повітряних каналів та розміщення всередині газовідвідного каналу меншого діаметра тощо.

Аналіз отриманих результатів показує також, що для промислових котелень повітряний метод є більш ефективним, особливо за низької температури нагріваної в теплоутилізаторі води. Так за початкової температури цієї води  $t_e = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  і температури навколишнього середовища  $t_{nc} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  для цегляної димової труби частка  $\sigma$  не перевищує 3 %, а коефіцієнт витрат  $\gamma_{нідм} - 2\text{ }%$ . При цьому для металевого димаря максимальні значення  $\sigma$  та  $\gamma_{нідм}$  не більші 7 і 5 % відповідно. У разі підвищення початкової температури води  $t_e$  значення  $\sigma$  та  $\gamma_{нідм}$  зростають, і тим інтенсивніше, чим вищі значення  $t_e$  та  $t_{zn}$ .

## Висновки:

1. Виконано аналіз ефективності застосування повітряного методу запобігання конденсатоутворенню в металевих та цегляних димових трубах котельних установок із водогрійними теплоутилізаторами різного призначення.
2. Виявлено закономірності зміни тепловологісного режиму в димових трубах залежно від режиму роботи котла, температури нагрітого підмішаного повітря та його частки в загальній витраті димових газів.
3. За результатами аналізу ефективності повітряного методу визначено відносні витрати теплоти  $\gamma_{нідм}$  на його реалізацію та необхідні для антикорозійного захисту газівідвідних трактів котельних установок частки  $\sigma$  підмішаного повітря у вихідних газах.

## Перелік використаних джерел

- Dolinsky, A. A., Fialko, N. M., Navrodska, R. A., & Gnedash, G. A. (2014). Basic principles of heat recovery technologies for small boiler heat-power engineering. *Industrial heat engineering*, 36(4), 27–34. [In Russian].
- Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., Presich, G. A., & Gnedash, G. A. (2017). Heat Methods of the Gas-Escape Channels of Boiler Installations by Heat-Utilization Technologies Application. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(6), 125–130. <https://doi.org/10.15421/40270625>
- Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., & Presich, G. O. (2016). Efficiency of gas-exhaust ducts in boiler installations by using heat recovery technologies. *Industrial heat engineering*, 38(1), 47–53. <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2016.06>
- Fialko, N. M., Navrodska, R. A., Shevchuk, S. I., Presich, G. A., Gnedash, G. A., & Glushak, O. U. (2014). Thermal methods of exhaust gas ducts protection of boiler plants with deep-cooled flue gases. (Ser. Engineering and natural science). *Modern science: investigations, ideas, results, technologies*, 2(15), 13–17. [In Russian].
- Fialko, N. M., Presich, G. A., Gnedash, G. A., Shevchuk, S. I., & Dashkovska, I. L. (2018). Increase the efficiency of complex heat-recovery systems for heating and humidifying of blown air of gas-fired boilers. *Industrial heat engineering*, 40(3), 38–45. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.06>
- Khvorenkov, D. A., Varfolomeeva, O. I., & Korepanov, E. V. (2017). Calculation of Temperature-Humidity Mode of Brick and Reinforced Concrete Chimneys Walls. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 19(9–10), 94–105. [In Russian].
- Navrodska, R., Fialko, N., Gnedash, G., & Sbrodova, G. (2017). Energy-efficient heat recovery system for heating the backward heating system water and blast air of municipal boilers. *Industrial heat engineering*, 39(4), 69–75. <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2017.10>

**Н. М. Фіалко, Р. А. Навродская, С. И. Шевчук, Г. А. Гнедаш, Г. А. Сбродова**  
Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев, Украина

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНОГО МЕТОДА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОНДЕНСАТООБРАЗОВАНИЯ В ГАЗООТВОДЯЩИХ ТРАКТАХ КОТЕЛЬНЫХ

Изложены результаты исследований эффективности использования в теплоутилизационных технологиях газопотребляющих отопительных и промышленных котельных воздушного метода предотвращения конденсатообразования в газоотводящих трактах. Рассматривались котельные установки с глубоким охлаждением отходящих газов, оснащенные водогрейными теплоутилизаторами, предназначенными для нагрева обратной теплосетевой воды и воды другого назначения. Исследовалось при разных режимах работы котлов тепловлажностное состояние в дымовых трубах разного типа при использовании для снижения влажности и повышения температуры уходящих газов сухого и нагретого воздуха от воздухоподогревателя котла. Определялись в рассматриваемых условиях основные параметры систем антикоррозионной защиты дымовых труб, обеспечивающих предотвращение в них конденсатообразования при соблюдении нормативных режимов эксплуатации этих труб. По значениям полученных параметров проведен сравнительный анализ эффективности применения рассматриваемого метода антикоррозионной защиты газоотводящих трактов для теплоутилизационных установок различного назначения. Показано, что использование в теплоутилизационных технологиях котлов метода подмешивания нагретого воздуха обеспечивает предотвращение конденсатообразования в дымовых трубах различного типа с разной долей воздуха в уходящих газах. Величина указанной доли зависит от режима работы котла, назначения утилизированной теплоты, характеристик дымовой трубы и других факторов.

**Ключевые слова:** теплоутилизационные технологии; глубокое охлаждение отходящих газов; влажность; точка росы; эффективность антикоррозионной защиты.

## **APPLYING THE AIR METHODS TO PREVENT CONDENSATION IN GAS EXHAUST DUCTS OF THE BOILER PLANTS**

The results of studies of the efficiency of use in the heat-recovery technologies of gas-fired heating and industrial boiler plants of the air method to prevent condensate formation in the gas exhaust ducts are presented. The boiler installations, equipped with hot-water heat-recovery exchangers, designed to heat the return heat-network water and other water are considered (for hot water system, technological use, water purification system and other consumers). The authors have researched heat and humidity state in chimneys of different types at used to reduce humidity and increase the temperature of exhaust-gases of dry and heated air from the air-heater of the boiler at different operating modes of boilers. Herewith, different modes of operation of the boilers during the heating period were considered with the values of the exhaust-gas temperature in the nominal mode of 160 and 200 °C and the temperature of the admixed air 150 and 250 °C. These values correspond to the practical range of variation of the parameters during the operation of the respective boilers. The main parameters of the corrosion protection systems for chimneys were determined under the conditions considered, which ensure the prevention of condensate formation in them while observing the regulatory regimes of operation of these chimneys. Namely, by the values of the obtained temperatures of the inner surface of the mouth of the chimney and the dew point of exhaust-gases were calculated necessary to prevent condensation formation of the proportion of mixing of heated air, depending on the temperature of the air. The comparative analysis of the effectiveness of the use of the considered method of anticorrosive protection of gas-exhaust ducts for heat-recovery plants for various purposes has been carried out. It is shown that the use of the method of mixing heated air in heat-recovery technologies of boilers prevents condensation formation in chimneys with different fractions of air in exhaust-gases. The value of this share depends on the mode of operation of the boiler, the purpose of recovered heat, the characteristics of the chimney and other factors.

**Keywords:** heat-recovery technologies; deep cooling of exhaust-gases; humidity; dew point; effectiveness of corrosion protection.