

ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ДИМОВИХ ТРУБ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК

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

Р. В. Сергієнко, кандидат технічних наук

Г. О. Гнедаш, кандидат технічних наук

Інститут технічної теплофізики НАН України

E-mail: navrodska-ittf@ukr.net

Анотація. *Викладено результати досліджень теплотехнічних та екологічних показників викидів димових труб газоспоживальних опалювальних котельних установок, оснащених системами глибокої утилізації теплоти відхідних газів.*

Розглянуто питання ефективності застосування для покращення екологічної безпеки димових труб за умов застосування теплоутилізаційних технологій теплових методів запобігання конденсації в цих трубах.

Досліджено такі методи, як часткове байпасування відхідних газів котла повз теплоутилізаційне устаткування, підсушування охолоджених після теплоутилізації димових газів у теплообмінниках-газопідігрівачах і підмішування до охолоджених газів сухого та нагрітого повітря від повітропідігрівача котельні. Проаналізовано ефективність використання вказаних методів з метою покращення умов розсіювання в навколишньому середовищі шкідливих викидів, що містяться у відхідних димових газах газоспоживальних котлів.

Визначено відносне зменшення максимальної приземної концентрації таких шкідливих викидів як оксиди азоту та вуглецю завдяки використанню в теплоутилізаційних системах зазначених теплових методів. Виконано зіставлення показників ефективності пропонованих методів та здійснено їх ранжування щодо покращення умов розсіювання шкідливих викидів димовими трубами різного типу.

Показано, що запропоновані методи, які зазвичай застосовуються для антикорозійного захисту димових труб котельних установок при використанні теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням димових газів, сприяють і покращенню (до 32 %) екологічності цих труб.

Ключові слова: *газоспоживальні котли, глибоке охолодження відхідних газів, зниження шкідливих викидів, теплові методи*

Актуальність. *Димові труби є важливими елементами паливоспоживальних теплоенергетичних установок різного призначення і слугують для безпечного*

видалення відпрацьованих продуктів згоряння (димових відхідних газів) у навколишнє середовище. Тому до них при проектуванні та експлуатації висуваються високі вимоги щодо їхньої надійності та екологічності, пов'язаної з дотриманням нормативних показників розсіювання в атмосфері шкідливих речовин, що містяться в димових газах.

Окрім необхідності дотримання екологічної безпеки димових труб до сучасних теплоенергетичних установок висуваються вимоги щодо економії палива, тобто підвищення їхнього ККД або коефіцієнта використання теплоти палива КВТП, що зазвичай реалізується шляхом застосування різних теплоутилізаційних технологій [1]. Реалізація таких технологій найчастіше призводить до відхилення умов експлуатації димових труб від нормативних. Ці відхилення мають як позитивні наслідки (зменшення температури відхідних газів і обсягів шкідливих речовин), так і негативні - порушення режимів роботи цих димарів щодо їхньої конструкційної безпеки та умов розсіювання в навколишньому середовищі забруднюючих речовин. Конструкційна безпека димових труб погіршується при глибокій теплоутилізації димових газів котельних установок, що пов'язано з корозійним руйнуванням оболонки димарів через конденсатоутворення на їхній внутрішній поверхні внаслідок зменшення температури цієї поверхні нижче точки роси водяної пари, що міститься в димових газах [2]. Для запобігання цьому руйнуванню застосовують теплові методи відвернення конденсатоутворення на внутрішніх поверхнях газовідвідних каналів. Серед них особливо вирізняються методи, пов'язані з тепловологісною обробкою димових газів котлів після їх теплоутилізації [3–5]. Застосовувані методи можуть одночасно слугувати і покращенню екологічних показників димових труб, оскільки вони сприяють підвищенню температури та швидкості димових газів, що суттєво впливає на умови розсіювання в навколишньому середовищі шкідливих викидів.

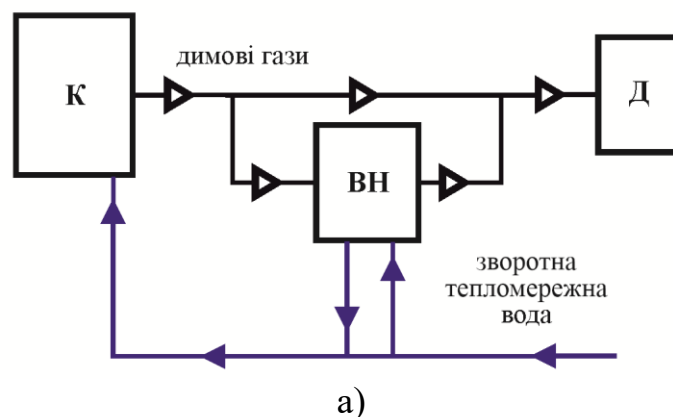
Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як свідчать матеріали літературних джерел, для запобігання антикорозійному руйнуванню газовідвідних каналів, і зокрема димових труб, в котельній практиці застосовують різні способи. До них належать способи, спрямовані на підвищення антикорозійних властивостей

корпусів газоходів та димових труб [6], способи зменшення втрат теплоти з поверхні цих трактів (підігрівання стінок димарів, облаштування вентиляційних каналів, методи підвищення теплоізоляційних властивостей оболонок димарів шляхом їх внутрішньої або зовнішньої теплоізоляції тощо) [2, 7], а також способи, пов'язані із застосуванням теплових методів тепловологісної обробки димових газів після їх теплоутилізації [3–5].

Мета дослідження – аналіз ефективності застосування для опалювальних котельних установок теплових методів запобігання конденсації в димових трубах різного типу для поліпшення їхньої екологічності.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися *основні завдання дослідження*, що полягали у визначенні для різних режимів роботи опалювального котла з системою теплоутилізації основних характеристик (температури t_r та швидкості V_r) димових газів та відносного зменшення максимальної приземної концентрації таких шкідливих викидів, як оксиди азоту NO_x і вуглецю CO при застосуванні різних теплових методів та димових труб.

Матеріали та методи дослідження. Проаналізовано ефективність використання з метою покращення екологічної безпеки димових труб таких теплових методів, як: часткове байпасування з часткою χ відхідних газів котла повз теплоутилізаційне устаткування, підсушування (підігрівання на величину Δt) охолоджених після теплоутилізації димових газів у теплообмінниках-газопідігрівачах, підмішування до охолоджених газів частини σ сухого та нагрітого повітря від повітропідігрівача котельні. Схеми відповідних котельних установок із застосуванням зазначених теплових методів наведено на рис.1.



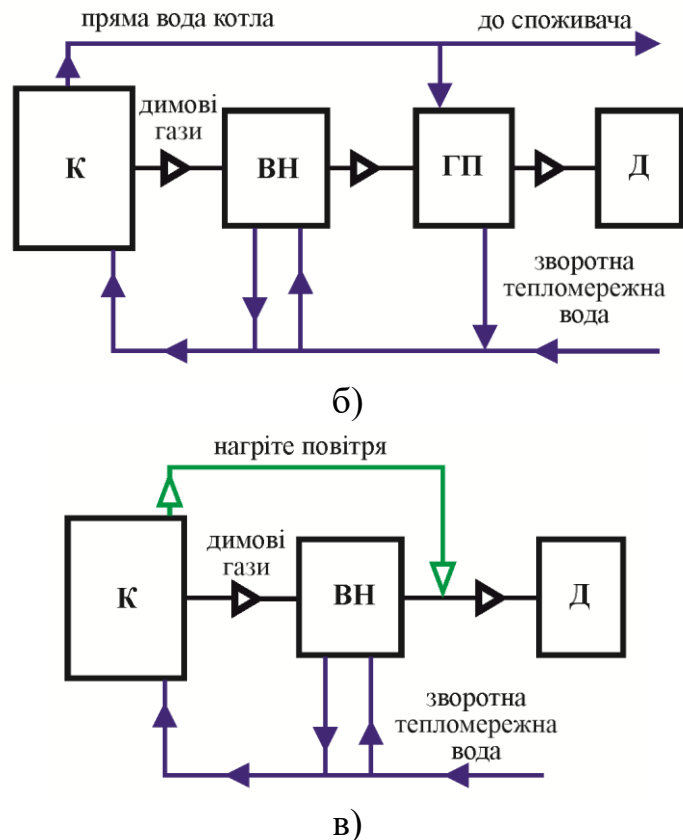


Рис. 1. Принципові схеми котельних установок із застосуванням трьох теплових методів: байпасування (а), підсушування в газопідігрівачі (б) та підмішування сухого нагрітого повітря (в):

К – котел; ВН – конденсаційний водонагрівач; ГП – газопідігрівач; Д – димова труба

Досліджувалися теплотехнічні параметри (температура та швидкість вихідних газів) опалювальних котлів номінальною теплопродуктивністю 2 МВт, оснащених теплоутилізаторами для нагрівання тепломережної води. Вказані параметри визначалися на виході з гирла димових труб різного типу (металевої та цегляної).

Вивчався вплив зазначених параметрів на зменшення максимальної приземної концентрації навколо димових труб таких шкідливих викидів, як оксиди азоту NO_x і вуглецю CO , при використанні запропонованих теплових методів. Дослідження екологічних показників виконувалось за методичними рекомендаціями [8]. При цьому визначалося відносне зменшення $C_{від}^{CO}$ і $C_{від}^{NO_x}$ зазначених концентрацій при застосуванні методів C_M порівняно з ситуацією без їхнього застосування C_0 :

$$C_{від}^{NO_x} = (C_0^{NO_x} - C_M^{NO_x}) / C_0^{NO_x} \cdot 100\%,$$

$$C_{від}^{CO} = (C_0^{CO} - C_M^{CO}) / C_0^{CO} \cdot 100\%.$$

Розрахунки здійснювалися для цегляної та металевої з антикорозійного матеріалу димових труб заввишки 45 м, розташованих в Україні в зоні південніше від 50° північної широти. Розрахункова маса шкідливої речовини, яка викидається в атмосферу за одиницю часу, становила $M = 1,11...0,25$ г/с; коефіцієнт, що враховує швидкість осідання шкідливих речовин в атмосфері для газів та коефіцієнт впливу рельєфу місцевості (для рівної або слабопересіченої місцевості з перепадом висот, що не перевищують 50 м на 1 км), приймалися рівними одиниці, розрахункові безрозмірні коефіцієнти, що враховують умови виходу димових газів з гирла труби становили $m = 0,98...1,23$ і $n=1,14...1,87$; різниця Δt між температурою відхідних газів t_r і температурою навколишнього середовища t_{nc} змінювалася в межах 40 ... 114 $^\circ\text{C}$.

Дослідження виконувалися в різних режимах роботи котлів протягом опалювального періоду відповідно до температури навколишнього середовища t_{nc} . Розрахунки здійснювались за умов дотримання проектних значень теплового навантаження котелень. Режими роботи відповідали тепломережному графіку котельні з температурним перепадом $\Delta t = 115-70$ $^\circ\text{C}$. У разі зменшення нижче 50 % теплового навантаження котлів зменшувалась кількість робочих котлів при відповідному збільшенні їхньої теплової потужності; температура відхідних газів за котлом в номінальному режимі становила 166 $^\circ\text{C}$. Температура підмішуваного повітря приймалася рівною 150 $^\circ\text{C}$. Рівні байпасування гарячих газів χ , підмішування повітря σ та нагрівання охолоджених газів Δt приймалися у практичному діапазоні значень, необхідних для відсутності конденсатоутворення в димовій трубі.

Нормативне значення максимальної приземної концентрації (гранично допустимої норми концентрації ГДК) становило за даними роботи [8] 5 $\text{мг}/\text{м}^3$ для CO , а для NO_x - 0,085 $\text{мг}/\text{м}^3$. Значення концентрацій викидів CO та NO_x у димових газах за котлом приймалися в практичному діапазоні згідно з режимними картами, обстежених авторами статті котлів, що експлуатуються в комунальних котельнях та відповідають сучасним вимогам. Так, максимальна концентрація CO не перевищувала 0,01 $\text{мг}/\text{м}^3$. Щодо вмісту оксидів азоту $C_r^{\text{NO}_x}$ у димових газах за

котлом, то вказане обстеження показало, що для переважної більшості котлів цей вміст змінювалося в межах 50-200 мг/м³. Найбільше значення концентрації $C_r^{NOx} = 200$ мг/м³ відповідає згідно з діючими нормами допустимій межі викидів оксидів азоту для газоспоживальних котельних установок.

Результати досліджень та їх обговорення. У таблиці наведено основні результати виконаних досліджень. Як свідчать отримані дані, застосування пропонувані теплових методів сприяє покращенню режимів експлуатації димових труб. Так, спостерігається зростання швидкості та особливо температури газових викидів на виході з гирла димових труб порівняно з ситуацією без використання даних методів. При цьому величина відносного зменшення викидів коливається від 1,5 до 32 % залежно від режиму роботи котла, застосовуваного методу та його характеристик (часток χ байпасування гарячих газів і σ підмішування нагрітого повітря та рівня нагрівання охолоджених газів Δt).

Загальними тенденціями для всіх застосовуваних методів і димових труб є збільшення рівня відносного зменшення викидів зі зростанням температури навколишнього середовища (що відповідає зменшенню теплового навантаження котла) і зростанням величин χ , σ і Δt . Слід зазначити, що для металеві димові труби внаслідок більшого рівня охолодження в ній димових газів величини $C_{від}^{CO}$ і $C_{від}^{NOx}$ менші, ніж для цегляної.

Що стосується ранжування застосовуваних теплових методів, то для умов, що розглядаються, найкращими результатами щодо зменшення відносних значень $C_{від}^{CO}$ і $C_{від}^{NOx}$ характеризується метод підігрівання газів, при застосуванні якого ці значення досягають для металеві димові труби майже 32 %. Другим за ефективністю є повітряний метод. Максимальні значення $C_{від}^{CO}$ і $C_{від}^{NOx}$ становлять приблизно 26 %. Дещо поступається в ефективності повітряному методу метод байпасування, який відповідає найменшим значенням величин $C_{від}^{CO}$ і $C_{від}^{NOx}$, особливо в осінньо-весняний період внаслідок зменшення температури байпасованих димових газів котла при зменшенні його навантаження в цей період. Значення $C_{від}^{CO}$ і $C_{від}^{NOx}$ при байпасуванні газів не перевищують 24 %.

Показники ефективності застосовуваних теплових методів для покращення екологічності димових труб

Найменування досліджуваних показників	Температура навколишнього середовища, °С	Найменування застосовуваного методу та його характеристик для двох типів матеріалу корпусу димових труб											
		Байпасування з часткою χ гарячих газів котла в суміші перед димовою трубою				Повітряний метод з часткою σ гарячого повітря в суміші перед димовою трубою				Підсушування з підігріванням газів у газопідігрівачі на величину Δt , °С			
		Цегла		Метал		Цегла		Метал		Цегла		Метал	
		$\chi=5$ %	$\chi=15$ %	$\chi=30$ %	$\chi=50$ %	$\sigma=4$ %	$\sigma=12$ %	$\sigma=16$ %	$\sigma=20$ %	$\Delta t=5$ °С	$\Delta t=10$ °С	$\Delta t=20$ °С	$\Delta t=40$ °С
Температура димових газів на виході з гирла труби t_r , °С	-10	74,5	81,6	90,3	105,3	74,0	79,8	79,4	82,1	75,9	80,8	88,1	107,0
	0	60,1	68,0	77,8	93,	59,8	66,1	67,4	70,0	61,0	65,9	73,6	92,4
	10	50,1	52,4	54,7	59,4	52,8	59,6	61,1	63,9	53,8	58,5	66,3	84,6
Швидкість димових газів на виході з гирла труби V_r , м/с	-10	8,6	8,8	9,0	9,4	8,9	9,7	10,0	10,4	8,7	8,8	9,0	9,5
	0	5,8	5,9	6,1	6,3	6,0	6,5	6,7	7,0	5,8	5,9	6,0	6,3
	10	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,5	3,7	3,8	3,1	3,2	3,2	3,4
Відносне зменшення викидів оксидів азоту та вуглецю $C_{\text{від}}^{\text{NOx}}, C_{\text{від}}^{\text{CO}}$, %	-10	2,8	8,2	15,2	23,4	5,2	14,0	17,8	21,2	3,9	7,5	13,8	24,2
	0	3,9	10,9	19,4	28,7	6,2	16,3	20,5	24,3	4,9	9,3	16,7	28,6
	10	1,5	4,4	8,5	13,6	6,9	17,9	22,2	26,2	5,8	10,9	19,1	31,7

Висновки і перспективи.

1. Результати виконаних досліджень свідчать, що пропоновані теплові методи, пов'язані з використанням низки способів тепловологісної обробки відхідних газів при використанні сучасних теплоутилізаційних технологій з глибоким

охолодженням димових газів сприяють покращенню (до 32 %) екологічності димових труб.

2. За даними порівняльного аналізу ефективності досліджуваних методів встановлено, що найефективнішим є метод підігрівання газів у газопідігрівачі, відносно значення зменшення максимальної приземної концентрації шкідливих викидів $C_{\text{від}}^{\text{CO}}$ і $C_{\text{від}}^{\text{NOx}}$ досягає для металевої димової труби майже 32 %; поступається йому в ефективності повітряний метод, максимальне значення $C_{\text{від}}^{\text{CO}}$ і $C_{\text{від}}^{\text{NOx}}$ становить приблизно 26 %, а ще дещо менш ефективним є метод байпасування, значення $C_{\text{від}}^{\text{CO}}$ і $C_{\text{від}}^{\text{NOx}}$ не перевищує 24 %.

Отримані результати досліджень використовуватимуться при проектуванні сучасних теплоутилізаційних технологій з глибоким охолодженням відхідних газів котельних установок.

Список використаних джерел

1. Фіалко Н.М., Пресіч Г.О., Гнедаш Г.О., Шевчук С.І., Дашковська І.Л. Підвищення ефективності комплексних теплоутилізаційних систем для підігрівання та зволоження дуттьового повітря газоспоживальних котлоагрегатів. Промислова теплотехніка. 2018. №40(3). С. 38–45. <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.06>.
2. Путрик С.Б., Баскаков А.П. Расчет температурно-влажностного режима газоотводящего тракта с учетом уноса из теплоутилизаторов. Промышленная энергетика. 2006. № 9. С. 36–39.
3. Фіалко Н.М., Навродська Р.А., Шевчук С.І., Степанова А.І., Пресіч Г.А., Гнедаш Г.А. Тепловые методы защиты газоотводящих трактов котельных установок. Киев: Типография «Про формат», 2018. 248 с.
4. Фіалко Н.М., Навродська Р.О., Шевчук С.І., Пресіч Г.О., Гнедаш Г.О. Теплові методи захисту газовідвідних трактів котельних установок під час застосування теплоутилізаційних технологій. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. №27(6). С. 125–130. <https://doi.org/10.15421/40270625>.
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. Scientific Bulletin of National Mining University. 2020. No 2. P. 96–100. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/096>.
6. Лужков В.А., Асташкин В.М., Субботин Е.В. Новые конструкции дымовых труб малых котельных. Новости теплоснабжения. 2005. № 6. С. 68–70.
7. Чернов С.Л., Долинин И.В., Дужих Ф.П. Реконструкция железобетонной дымовой трубы с противодавлением в воздушном зазоре. Теплоэнергетика. 2002. №2. С. 29–32.

8. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий ОНД – 86. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 93 с.

References

1. 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>.

2. Putrik, S.B., & Baskakov, A. P., (2006). Raschet temperaturno-vlazhnostnogo rezhima gazootvodiashchego trakta s uchetom unosa vlagi iz teploutilizatorov [Calculation of the temperature and humidity regime of the gas exhaust tract, taking into account the removal of moisture from heat recovery units]. *Industrial energy*, (9), 36–38.

3. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., Stepanova, A. I., Presich, G. O. & Gnedash, G. O., (2018). Teplovyie metody zashchity gazootvodyashchikh traktov kotel'nykh ustanovok. Kyiv: «Pro format». 248 p.

4. Fialko, N. M., Navrodska, R. O., Shevchuk, S. I., Presich, G. O., & Gnedash, G. O. (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>

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. Naukovyi Visnyk*, (2), 96-100. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/096>

6. Luzhkov, V.A., Astashkin, V.M., Subbotin, E.V. (2005). Novye konstruktsii dymovykh trub malykh kotelnykh [New designs of chimneys of small boiler houses]. *Heat supply news*. 2005. № 6. С. 68–70.

7. Chernov, S. L., Dolinin, I. V., Duzhykh, F. P. (2002). Rekonstruktsiia zhelezobonnoy dymovoy truby s protivodavleniem v vozdushnom zazore [Reconstruction of a reinforced concrete chimney with counterpressure in the air gap]. *Thermal power engineering*, (2), 29-32.

8. Metodika rascheta kontsentratsiy v atmosfernom vozduhe vrednykh veshchestv, sodержashchikhsia v vybrosakh predpriiaty OND-86 [Method of calculation concentrations in the atmospheric air of harmful substances contained in the emissions of enterprises OND-86]. (1987). Leninhhrad: Hidrometeoizdat.

IMPROVING THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF BOILER PLANTS CHIMNEYS

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

Abstract. *The study results of heat engineering and environmental indicators of emissions from chimneys of gas-consuming heating boiler plants equipped with systems for deep heat recovery of exhaust gas are presented.*

The issues of the application heat methods efficiency to prevent condensate formation in these pipes to improve the environmental safety of chimneys when using heat-recovery technologies are considered.

Methods such as partial bypassing of boiler exhaust gases past heat-recovery equipment, drying of the exhaust gases cooled after heat-recovery in heat exchangers-gas heaters and mixing dry and heated air from the boiler house air heater into the cooled gases have been studied. The effectiveness of using these methods to improve the dispersion conditions in the environment of harmful emissions contained in the flue gases of gas-consuming boilers has been analyzed.

The relative decrease in the maximum surface concentration of such harmful emissions as nitrogen and carbon oxides due to the use of specified heat methods in heat-recovery systems has been determined. Comparison of efficiency indicators of the proposed methods and their ranking to improve the conditions for the dispersion of harmful emissions by chimneys of various types is carried out. It is shown that the proposed methods, usually used for corrosion protection of boiler plants chimneys using heat-recovery technologies with deep cooling of exhaust gases, also contribute to improving (up to 32 %) of the environmental friendliness of these pipes. The ranking of the considered heat methods is carried out.

Key words: gas-consuming boilers, deep cooling of exhaust gases, reduction of harmful emissions, heat methods